



Adalberto Simões Pedras  
(Licenciado)

**Sistema de Detecção e  
Diagnóstico de falhas num  
retificador de alimentação  
do circuito de excitação  
de um gerador síncrono**

Dissertação de mestrado em Engenharia  
Eletrotécnica e de Computadores - ramo  
energias renováveis e sistemas de  
potência.

Realizada sob orientação do Professor  
Doutor Victor Manuel De Carvalho  
Fernão Pires e coorientação do Professor  
Doutor Duarte de Mesquita e Sousa

Dezembro de 2014



# Agradecimentos

---

Expresso aqui os meus agradecimentos:

Ao meu orientador, Professor Doutor Victor Manuel De Carvalho Fernão Pires, e ao meu coorientador Professor Doutor Duarte de Mesquita e Sousa pela competência, dedicação, disponibilidade e paciência em colaborar na elaboração desta dissertação, apoiando e fornecendo informação sempre que necessário.

À minha família, em particular à minha mulher, pelo apoio e coragem que me deram durante estes anos de aprendizagem.

Aos meus amigos e colegas do Mestrado pela entreaajuda, incentivo, convívio durante todo o percurso até aqui.

Ao meu colega de trabalho José Manuel Dias pelo apoio e motivação que me transmitiu desde o início do curso.

# Resumo

---

Neste trabalho são apresentadas novas abordagens para a detecção e diagnóstico de avarias nos tirístores que constituem o retificador da excitação de um gerador síncrono. São propostos dois métodos, um baseado na análise das correntes alternadas de alimentação do retificador e o outro na tensão de excitação. O primeiro método caracteriza-se pela criação de padrões típicos gerados pelas correntes de alimentação do retificador. O segundo método utiliza uma abordagem similar, ou seja, baseia-se na criação de padrões, mas da tensão de excitação. No primeiro método a identificação de falhas é efetuada através de um algoritmo designado de centro de massa. Para a identificação dos padrões obtidos através do segundo método, será utilizado um algoritmo baseado na análise das componentes principais.

Numa primeira fase é explicada a constituição e o funcionamento da turbina a vapor, o seu funcionamento em conjunto com a caldeira, as várias formas de controlar a potência ativa do gerador e a constituição do próprio gerador. De seguida, é introduzido o sistema da excitação, os seus componentes e os modos de funcionamento. Finalmente são apresentados e aplicados dois métodos de detecção e diagnóstico de avarias em retificadores. Na primeira abordagem o método proposto é baseado na análise dos padrões tridimensionais obtidos através dos algoritmos de cálculo do “raio equivalente” e do centro de massa. Para o segundo método foi utilizado uma análise de padrões bidimensionais baseados na análise das componentes principais. A confirmação dos dois métodos é feita através das simulações que indicam diferentes padrões para defeitos em cada um dos tirístores do retificador, no retificador, assim como para a situação de ausência de qualquer defeito.

**Palavras-chave:** Detecção e diagnóstico em retificadores, centro de massa, análise das componentes principais, reconhecimento de padrões, correntes trifásicas em 3D, defeito em tirístores.

# Abstract

---

In this work it is presented new approaches for detection and diagnosis of malfunction on rectifier's thyristor of synchronous generator's excitation. Two methods are proposed, one based on supply alternated currents and the other on excitation's output voltage. The first one is characterized by the creation of typical patterns generated by rectifier supply currents. The second method uses a similar approach, since it is also based in patterns creation. However, these patterns are obtained from the output voltage of the rectifier. In the first method the fault identification is made through an algorithm designated as mass center. For the patterns identification in the second method, it will be use an algorithm based in Principal Components Analysis.

On a first phase is explained the constitution and operation of the steam turbine, its operation together with the boiler, the several ways to control the active power of the generator and the constitution of the generator itself. Then, it is introduced the excitation system, its components and operating modes. Finally, it will be presented and applied the two detection and diagnosis methods of malfunctions in the rectifier. In the first approach the proposed method is based in three-dimensional patterns analysis obtained through the "equivalent radius" and mass center algorithm. For the second method it is used bi-dimensional patterns analysis based in principal components. The confirmation of these two methods are done through simulations that show the different patterns that are obtained with no-fault or faults in each of the thyristors of the rectifier.

**Keywords:** Detection and diagnosis in rectifiers, mass center, Principal Components Analysis, patterns recognition, three phase currents in 3D, thyristors's faults.

# Índice

Agradecimentos .....	iii
Resumo .....	iv
Abstract .....	v
Índice de Tabelas .....	x
Lista de Abreviaturas .....	xi
Lista de Símbolos .....	xii
Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1. Preâmbulo.....	1
1.2. Organização da dissertação .....	2
Capítulo 2.....	3
Turbogerador.....	3
2.1. Introdução .....	3
2.2. Turbina .....	3
2.2.1. Ciclo do vapor .....	4
2.2.2. Turbina de Alta Pressão .....	5
2.2.3. Turbina de Média Pressão .....	5
2.2.4. Turbina de Baixa Pressão .....	5
2.2.5. Sistema de Regulação da Turbina .....	5
2.2.5.1. Controlador de Velocidade/frequência .....	6
2.2.5.2. Controlo de carga.....	7
2.3. Gerador .....	10
Capítulo 3.....	13
Sistema de excitação.....	13
3.1. Visão geral do Sistema.....	13
3.2. Descrição do diagrama unifilar .....	14
3.3. Transformador.....	15
3.4. Excitação inicial.....	15
3.5. Controladores.....	15
3.6. <i>Circuito de supressão de campo</i> .....	16

3.7. Funções de controlo .....	17
3.7.1. Controlo automático de tensão (AVR) .....	17
3.7.1.1. Valor de referência para o AVR .....	18
3.7.1.2. Referência de tensão .....	19
3.7.2. Limitadores do AVR .....	22
3.7.3. Controladores super impostos .....	25
3.7.3.1. Controlador de potência reativa .....	26
3.7.3.2. Função de descarga de potência reativa .....	26
3.7.3.3. Controlador de Fator de Potência .....	26
3.8. Falhas no circuito da excitação .....	27
Capítulo 4 .....	29
Técnicas de diagnóstico em conversores eletrónicos de potência .....	29
4.1. Introdução .....	29
4.2. Avarias e técnicas de deteção e retificadores .....	30
4.3. Avarias e técnicas de deteção em inversores .....	32
Capítulo 5 .....	35
Deteção e diagnóstico no circuito de excitação .....	35
5.1. Introdução .....	35
5.2. Deteção e diagnóstico pelo método centro de massa das correntes de alimentação .....	36
5.3. Análise das falhas no circuito de excitação .....	44
5.3.1. Sem controlo de tensão ( $R=0,1\Omega$ ) .....	44
5.3.2. Simulação sem controlo de tensão ( $R=0,3\Omega$ ) .....	52
5.3.3. Simulação com controlo de tensão ( $R=0,1\Omega$ ) .....	53
5.3.4. Simulação com controlo de tensão ( $R=0,3\Omega$ ) .....	62
5.3.5. Resposta do sistema para variações de tensão CC .....	63
5.4. Deteção de falhas no retificador de excitação pela análise da tensão CC .....	69
5.4.1. Análise das componentes principais .....	72
5.4.2. Deteção de falhas .....	73
Capítulo 6 .....	79
Conclusões .....	79
Bibliografia .....	81

# Índice de Figuras

Figura 1: Circuito água-vapor .....	4
Figura 2: Estatismo para controlo de frequência [3] .....	7
Figura 3: Controlador de carga não coordenado .....	8
Figura 4: correção do pedido de carga em função do erro de pressão [4] .....	9
Figura 5: Controlador de carga coordenado .....	10
Figura 6: Vista Geral do sistema de excitação [6] .....	13
Figura 7: Diagrama de blocos típico de um sistema de excitação [6] .....	14
Figura 8: Diagrama de blocos do AVR [6] .....	18
Figura 9: Função do <i>setpoint</i> de tensão [6] .....	19
Figura 10: <i>Q-Static</i> .....	20
Figura 11: <i>P-Static</i> [6] .....	20
Figura 12: Limitador $V/f$ .....	21
Figura 13: Arranque suave [6] .....	21
Figura 14: Diagrama de potência, limites do AVR [6] .....	23
Figura 15: Correspondência física do ângulo polar [7] .....	24
Figura 16: controladores super impostos [6] .....	25
Figura 17: Ação do <i>setpoint</i> na potência reativa [6] .....	26
Figura 18: Ação do ponto de funcionamento no $\cos\phi$ [6] .....	27
Figura 19: Possíveis falhas em retificadores .....	31
Figura 20: Esquema genérico de um inversor .....	32
Figura 21: Circuito retificador .....	36
Figura 22: Diagrama de blocos da cadeia de controlo da tensão CC .....	36
Figura 23: AVR <i>Simulink</i> .....	37
Figura 24: Representação bidimensional das correntes trifásicas de alimentação .....	38
Figura 25: Representação 3D das correntes de alimentação .....	38
Figura 26: Forma de onda das correntes com defeito em T1 .....	39
Figura 27: Deformação do hexágono e consequente deslocação do centro de massa .....	39
Figura 28: Representação bidimensional das correntes de alimentação (durante a falha) .....	40
Figura 29: Centro de massa e raio equivalente na representação 3D .....	41
Figura 30: Comportamento das variáveis de diagnóstico normalizada para a situação de falha. ....	43
Figura 31: Histerese utilizada na identificação de falha em cada semiconductor .....	43
Figura 32: Forma das ondas quando T1 está em defeito ( $R=0,1\Omega$ sem AVR) .....	46
Figura 33: Deslocação do centro de massa quando T1 está em defeito ( $R=0,1\Omega$ sem AVR) .....	46
Figura 34: Variação de VDN durante a falha de T1 ( $R=0,1\Omega$ sem AVR) .....	47
Figura 35: Forma das ondas quando T6 está em defeito ( $R=0,1\Omega$ sem AVR) .....	48
Figura 36: Deslocação do centro de massa quando T6 está em defeito ( $R=0,1\Omega$ sem AVR) .....	49
Figura 37: Variação de VDN durante a falha de T6 ( $R=0,1\Omega$ sem AVR) .....	50
Figura 38: Forma das ondas quando T5 está em defeito ( $R=0,1\Omega$ sem AVR) .....	50
Figura 39: Deslocação do centro de massa quando T5 está em defeito ( $R=0,1\Omega$ sem AVR) .....	51
Figura 40: Variação de VDN durante a falha de T5 ( $R=0,1\Omega$ sem AVR) .....	52



Figura 41: Forma das ondas quando T1 está em defeito ( $R=0,1\Omega$ com AVR) .....	55
Figura 42: Deslocação do centro de massa quando T1 está em defeito ( $R=0,1\Omega$ com AVR).....	56
Figura 43: Variação de VDN durante a falha de T1 ( $R=0,1\Omega$ com AVR) .....	56
Figura 44: Forma das ondas quando T6 está em defeito ( $R=0,1\Omega$ com AVR) .....	57
Figura 45: Deslocação do centro de massa quando T6 está em defeito ( $R=0,1\Omega$ com AVR).....	58
Figura 46: Variação de VDN durante a falha de T6 ( $R=0,1\Omega$ com AVR) .....	59
Figura 47: Forma das ondas quando T5 está em defeito ( $R=0,1\Omega$ com AVR) .....	60
Figura 48: Deslocação do centro de massa quando T5 está em defeito ( $R=0,1\Omega$ com AVR).....	61
Figura 49: Variação de VDN durante a falha de T5 ( $R=0,1\Omega$ com AVR) .....	62
Figura 50: Valor de referência e tensão CC.....	64
Figura 51: Representação 3D das correntes nos instantes de mudança do valor de referência da tensão CC.....	65
Figura 52: Variação das VDN com alteração do setpoint de tensão CC no instante 4s .....	66
Figura 53: Variação das VDN com alteração do setpoint de tensão CC no instante 7s .....	67
Figura 54: Variação das VDN com alteração do setpoint de tensão CC no instante 10s .....	67
Figura 55: Variação das VDN com alteração do setpoint de tensão CC no instante 13s .....	68
Figura 56: Geração dos sinais utilizados para a criação de padrões.....	70
Figura 57: Tensão de saída e tensão desfasada na ausência de defeito.....	70
Figura 58: Padrão em funcionamento normal .....	71
Figura 59: Tensão de saída e tensão desfasada na presença do defeito.....	71
Figura 60: Padrão para funcionamento com falha de circuito aberto.....	72
Figura 61: Comparação dos valores próprios $\lambda_1$ e $\lambda_2$ [23] .....	73
Figura 62: Diagrama de blocos do algoritmo de deteção de falha .....	75
Figura 63: Variação dos valores próprios na presença do defeito em T1 .....	75
Figura 64: Comportamento da corrente durante a presença do defeito em T1 .....	76
Figura 65: Comportamento da tensão quando se entra no regime descontínuo .....	76
Figura 66: Variação dos valores próprios durante o defeito de T6.....	77
Figura 67: Variação dos valores próprios durante o defeito em T1 com o AVR em funcionamento .....	78

# Índice de Tabelas

---

Tabela 1: Relação entre os semicondutores em defeito e os sinais dos VDN* .....	44
Tabela 2: Valores de VDN ( $R=0,1\Omega$ sem AVR) .....	45
Tabela 3: Valores de VDN* ( $R=0,1\Omega$ sem AVR) .....	45
Tabela 4: Valores de VDN ( $R=0,3\Omega$ sem AVR) .....	53
Tabela 5: Valores de VDN* ( $R=0,3\Omega$ sem AVR) .....	53
Tabela 6: Valores de VDN ( $R=0,1\Omega$ com AVR) .....	54
Tabela 7: Valores de VDN* ( $R=0,1\Omega$ com AVR) .....	54
Tabela 8: Valores de VDN ( $R=0,3\Omega$ com AVR) .....	63
Tabela 9: Valores de VDN* ( $R=0,3\Omega$ com AVR) .....	63
Tabela 10: Valores de referência para o controlador de tensão do retificador de excitação. ...	63
Tabela 11: Valores das VDN nos instantes de alteração de referência da tensão CC.....	68
Tabela 12: Valores de VDN* nos instantes de alteração do SP de tensão CC .....	69

# Lista de Abreviaturas

---

AP	Alta Pressão	
AUTO	Automático	
AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i>	
BP	Baixa Pressão	
CC	Corrente contínua	
DSC	<i>Distributed Control System</i>	
FCB	<i>Field Circuit Break</i>	
FCR	<i>Field Current Regulator</i>	
FP	Fator de Potência	
I	<i>Integrator</i>	
I/O	Input/Output	
ICV	<i>Interception Control Valve</i>	
$I_{f0}$	Corrente de campo para gerador em vazio	[A]
$I_{fmax}$	Corrente de campo máxima	[A]
$I_{fmin}$	Corrente de campo mínima	[A]
$I_{fN}$	Corrente de campo para gerador à carga nominal	[A]
$I_{GN}$	Corrente do gerador à carga nominal	[A]
ISV	<i>Interception Stop Valve</i>	
MCV	<i>Main Control Valve</i>	
MSV	<i>Main Stop Valve</i>	
PC	<i>Principal Component</i>	
PI	Controlador Proporcional Integral	
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo	
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>	
PV	<i>Process Variable</i>	
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>	
$r_c$	Raio do círculo	[A]
$r_{c\_av}$	Raio equivalente do círculo	[A]
SP	<i>Setpoint</i>	
SPI	<i>Setpoint Integrator</i>	
$T_i$	Tempo de integração	[s]
$U_g$	Tensão do gerador	[V]

# Lista de Símbolos

---

$dcm\_1; dcm\_2; dcm\_3$	Coordenadas do centro de massa	[A]
$I1; i2; i3$	Correntes de alimentação do retificador	[A]
$P$	Potência ativa	[W]
$PC$	<i>Principal componente</i>	
$Q$	Potência reativa	[var]
$T1, T2, T3, T4, T5, T6$	Tirístores 1, 2, 3, 4, 5, 6	
$V\_dc$	Tensão contínua à saída do retificador	[V]
$V\_dc\_desf$	Tensão contínua à saída do retificador com um atraso de meio ciclo	[V]
$VDN1; VDN2; VDN3$	Variável Normalizada de Diagnóstico	
$\alpha$	Ângulo de disparo	[°]
$\delta$	Ângulo Polar	[°]
$\lambda_1$	Valor próprio da primeira componente principal	
$\lambda_2$	Valor próprio da segunda componente principal	
$\phi$	Fluxo magnético	[weber]
$\varphi$	Ângulo entre a tensão e a corrente	[°]
$\omega$	Velocidade angular	[rad/s]

# Capítulo 1

## Introdução

---

### 1.1. Preâmbulo

---

Os sistemas de excitação dos geradores síncronos permitem controlar a tensão aos terminais do gerador, assim como a potência reativa que é trocada com a rede elétrica.

O sistema de excitação é um equipamento de potência de importância fundamental na geração de energia elétrica, assim como de estabilização da rede. Sendo também dos equipamentos mais dispendiosos utilizados na geração, é fundamental evitar que defeitos, ocorridos no seu interior, provocados por fontes externas ou por fadiga do próprio equipamento, alastrem às outras partes constituintes do sistema de excitação, assim como o disjuntor, os barramentos, o sistema de escovas que faz a ligação com o rotor ou mesmo ao próprio rotor do gerador.

Qualquer paragem deste equipamento por avaria terá custos avultados, devido ao preço dos constituintes do equipamento e também pela indisponibilidade causada no grupo gerador.

Este sistema integra também equipamentos redundantes, sendo provido de sistemas de monitorização do seu estado de funcionamento, de modo a poder comutar rapidamente entre componentes redundantes, evitando, em primeiro lugar, a propagação do defeito e em segundo, a perda de produção.

O objetivo principal desta dissertação é estudar a constituição e funcionamento dos sistemas de excitação existentes na Central Termoelétrica de Sines, e desenvolver dois métodos de deteção e diagnóstico de avarias nos retificadores constituintes destes sistemas. O primeiro método baseia-se na análise do “raio equivalente” e do centro de massa, criado pela representação, num referencial tridimensional, das correntes trifásicas de alimentação do retificador. Pretende-se através desta análise identificar padrões para sete situações

diferentes: numa das situações não existe qualquer anomalia e nas seis outras situações correspondentes existem defeitos em cada um dos tirístores que constituem o retificador. O segundo método baseia-se na análise das componentes principais, que, através da tensão de saída do retificador, torna possível identificar um funcionamento anómalo do retificador, não tendo contudo a capacidade de identificar o semiconductor em falha.

Para atingir o objetivo, de detetar e diagnosticar avarias, são feitas simulações submetendo o retificador a avarias aleatórias nos tirístores, permitindo a identificação dos padrões tridimensionais correspondentes a cada avaria no caso do primeiro método. Para o segundo método são efetuadas simulações provocando novamente avarias aleatórias, tornando possível verificar que o método identifica, independentemente das condições, o defeito no retificador.

Para a simulação do sistema de excitação foi utilizado o *software SIMULINK*, onde foi programado o sistema de controlo de tensão automático, o gerador de impulsos e a ponte trifásica a tirístores. Foi também utilizado o MATLAB para obtenção e análise do “raio equivalente”, do centro de massa e das componentes principais de modo a detetar defeitos no retificador e identificar o componente em falha.

## 1.2. Organização da dissertação

---

A presente dissertação encontra-se organizada em capítulos devidamente numerados de forma a permitir uma leitura e compreensão dos assuntos abordados:

- **Capítulo I** – Apresentação dos objetivos da dissertação. Introdução aos sistemas de excitação, função e importância na geração de energia. Indicação do princípio utilizado na deteção e diagnóstico de avarias nos retificadores;

- **Capítulo II** – Turbogenerador - Introdução da turbina a vapor e gerador. Abordagem aos modos de funcionamento da turbina e dos vários controladores de potência ativa;

- **Capítulo III** – Sistema de excitação -Introdução ao sistema de excitação. Identificação e estudo dos seus componentes e dos vários modos de funcionamento;

- **Capítulo IV** – Técnicas de diagnóstico em conversores eletrónicos de potência – Abordagem dos vários métodos existentes para deteção e diagnóstico de falhas em inversores e retificadores;

- **Capítulo V** - Deteção e diagnóstico de falhas no circuito de excitação – Abordagem à programação utilizada, simulação das anomalias no retificador, análise dos resultados obtidos, identificação dos vários padrões;

- **Capítulo VI** – Conclusões.

# Capítulo 2

## Turbogerador

---

### 2.1. Introdução

---

A Central termoelétrica de Sines é do tipo convencional, produzindo energia elétrica a partir da energia térmica gerada pela queima de carvão.

A Central é composta por 4 grupos, em que a potência de cada um é de 314MW. Cada grupo é constituído por um gerador de vapor unitário, com uma capacidade de vaporização de 950T/h, uma turbina composta por 4 corpos, um gerador de 353MVA e um transformador de 340MVA.

A energia elétrica produzida é entregue à rede elétrica nacional através das linhas de 150kV e 400kV.

### 2.2. Turbina

---

A turbina a vapor é alimentada por vapor produzido numa caldeira convencional. A turbina é constituída por um corpo simples de alta pressão, um corpo simples de média pressão e por dois corpos duplos de baixa pressão [1].

O corpo de alta pressão é alimentado com vapor sobreaquecido com uma pressão de 16,2MPa a uma temperatura de 530°C. O corpo de média pressão é alimentado com vapor reaquecido, em que a sua temperatura é igualmente 530°C mas a pressão ronda os 4.2MPa. Os corpos de baixa pressão são alimentados com o vapor de saída do corpo de média pressão.

## 2.2.1. Ciclo do vapor

O vapor vivo proveniente da caldeira é fornecido à turbina de alta pressão através das duas válvulas de isolamento (MSV) e das 4 válvulas de controlo (MCV), onde é expandido. Após a expansão o vapor perde pressão e temperatura, sendo necessário reaquecê-lo passando novamente a vapor sobreaquecido. Após elevar novamente à temperatura apropriada, é encaminhado para a turbina de média pressão através das duas válvulas de Interceção de isolamento (ISV) e interceção de controlo (ICV). Depois de expandir novamente, é dirigido para os dois corpos duplos de baixa pressão onde é turbinado ficando com a pressão existente no condensador. Por fim o vapor é condensado no condensador.

As bombas de extração conduzem os condensados através dos quatro pré-aquecedores de baixa pressão, onde aumentam de temperatura através da permuta de calor com o vapor retirado das várias extrações existentes nas turbinas de baixa pressão. Após a passagem pelos pré-aquecedores de baixa pressão, a água é bombada através das bombas de alimentação adquirindo uma pressão ligeiramente superior à existente na caldeira. Antes de entrar novamente na caldeira, a temperatura é novamente elevada através dos pré-aquecedores de alta pressão, que têm como fonte de calor as extrações de vapor existentes nas turbinas de alta e média pressão. Após este último estágio a água é entregue à caldeira iniciando-se novamente o ciclo.

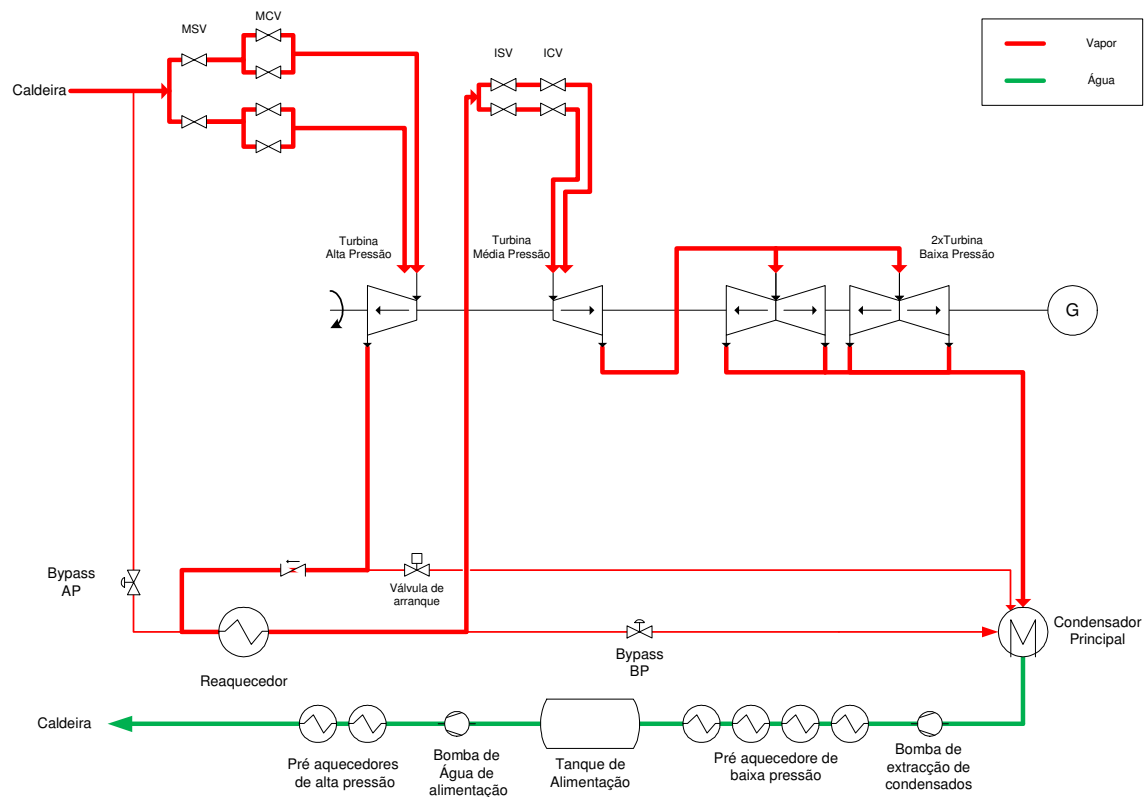


Figura 1: Circuito água-vapor



Este circuito de vapor, assim como as turbinas, estão apresentados de forma esquemática na Figura 1, onde é também possível identificar o circuito de pré-aquecimento de água e as bombas de extração de condensados e de água de alimentação.

O ciclo principal de vapor tem várias extrações de modo a elevar a eficiência da turbina a vapor.

### **2.2.2. Turbina de Alta Pressão**

---

A turbina de alta pressão é composta por uma roda de ação e por dois invólucros de aço fundido. O invólucro exterior está alinhado horizontalmente com o eixo da turbina, enquanto o invólucro interno está disposto com uma inclinação de 50°.

Ambos os invólucros estão fixos, de modo a poderem deslocar-se com as dilatações e contrações, sem exercerem qualquer força de torção no veio da turbina.

### **2.2.3. Turbina de Média Pressão**

---

A turbina de média pressão é constituída pelo rotor e pelos dois invólucros, o interno e o externo. Os invólucros são fixos de modo a permitir um deslocamento em qualquer direção, sem que o seu centro perca o alinhamento com o veio.

### **2.2.4. Turbina de Baixa Pressão**

---

A turbina de baixa pressão é composta por dois corpos. Cada corpo possui o seu rotor e dois invólucros, o interno e o externo. Ambos os corpos são de escoamento duplo.

### **2.2.5. Sistema de Regulação da Turbina**

---

O sistema de regulação da turbina está dividido em dois sistemas: o sistema de controlo e o sistema de segurança.

O sistema de controlo [2] é efetuado com sistemas eletrónicos e hidráulicos. Todas as funções de controlo estão programadas no sistema *Advant*, enquanto os atuadores das válvulas de regulação são atuados hidraulicamente. A conversão dos sinais elétricos em sinais hidráulicos é efetuada através do conversor eletrohidráulico.

As principais funções de segurança são realizadas hidraulicamente, outras são efetuadas pneumática e eletricamente.

Os elementos com maior importância na operação da turbina são: duas válvulas de isolamento principais (MSV); quatro válvulas de regulação principais (MCV); duas válvulas de isolamento de interceção (ISV) e duas válvulas de moderação (ICV). Todas estas válvulas podem ser testadas com a turbina em funcionamento, sem criar grandes perturbações na carga do gerador.

Este sistema de controlo tem programado todos os controlos relativos à turbina, mas apenas se irá fazer uma breve descrição dos controladores de velocidade/frequência e carga.

### **2.2.5.1. Controlador de Velocidade/frequência**

---

O controlador de velocidade/frequência, dependendo do modo de funcionamento da turbina, tem comportamentos distintos.

Quando a turbina está em vazio, isto é, o gerador não está ligado à rede, o controlador de velocidade/frequência funciona com o controlador Proporcional-Integral (PI), tendo um ganho de 5 e um tempo de integração  $T_i=20s$ . Em modo de carga, já com o gerador ligado à rede, o controlador funciona apenas com o controlo proporcional (P).

Em modo de carga, o integrador fica fora de serviço e é alterado o ganho. O controlador fica exclusivamente proporcional com um ganho de 20. Neste caso, o erro sofre a influência de uma banda morta. O objetivo da banda morta é impedir que o controlador de velocidade/frequência faça correções na velocidade da turbina quando os erros são inferiores a  $\pm 1\%$ .

O controlador comporta também um limitador de aceleração. Este limitador atua para variações de velocidade superiores a 50rps. Quando o limitador atua, o sistema de controlo assume que há perturbações na rede elétrica e desliga a banda morta ficando, deste modo, a funcionar como controlador de frequência (controlo proporcional).

O controlador de frequência funciona segundo uma rampa denominada por estatismo. O declive da rampa corresponde a uma variação de 100% da carga para um erro de 5% na entrada do controlador. No caso de, por exemplo, a frequência subir, o controlador diminui a abertura das válvulas de regulação tentando evitar um maior desvio da frequência, podendo mesmo fechá-las, para uma frequência maior ou igual a 53Hz com a consequente saída do grupo da rede. No caso contrário, de diminuição de frequência, o controlador irá tentar

impedir a desaceleração abrindo mais as válvulas. Neste caso o limite é a proteção de frequência baixa, que atua com o valor de 47.5Hz retirando o grupo da rede elétrica. Este valor de frequência baixa está parametrizado nas proteções elétricas do gerador.

A Figura 2 representa a rampa do estatismo. O eixo das abcissas representa a variação da frequência, e o eixo das ordenadas a consequente correção de carga. Pode-se observar que, para ambas as rampas, com e sem banda morta, se verifica um “deslizamento” para frequências altas. Tal comportamento deve-se ao facto da primeira banda morta alterar o seu valor para cargas inferiores a 25MW.

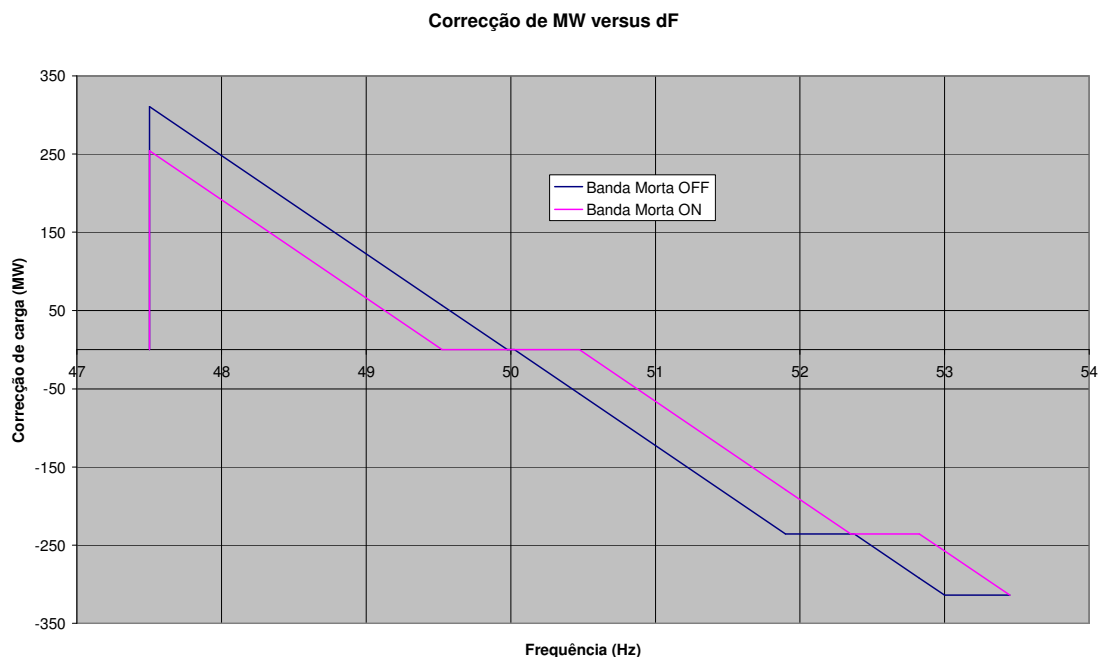


Figura 2: Estatismo para controlo de frequência [3]

## 2.2.5.2. Controlo de carga

Depois do paralelo existem vários modos para controlo de carga, neste trabalho apenas serão mencionados os que estão inseridos no sistema de controlo da turbina.

### Controlo de carga não coordenado

O controlador de carga não coordenado<sup>1</sup> é colocado em funcionamento no momento do paralelo. Este compara a medida de *setpoint* introduzido pelo operador com o valor da carga

<sup>1</sup> A Coordenação é um modo de funcionamento em que a turbina e a caldeira se entrelaçam no controlo das suas variáveis, a potência ativa e a pressão do vapor.

no gerador. Este *setpoint* é sujeito à limitação de pressão no condensador se esta estiver presente. Pode também ser colocado com o valor de -3% no caso da margem de carga gerada no TURBOMAX<sup>2</sup> descer para valores abaixo de 0%.

O *setpoint* varia respeitando um gradiente, sendo este também definido pelo operador. O gradiente é limitado consoante o tipo de arranque que está seleccionado, isto é, se o arranque é a frio, a morno ou a quente<sup>3</sup>. É também afetado no caso de uma rejeição de carga.

O valor do *setpoint* pode ser bloqueado, desligando o programa de carga, por exemplo, no caso de uma subida de carga é possível interrompê-la, desligando o programa de carga.

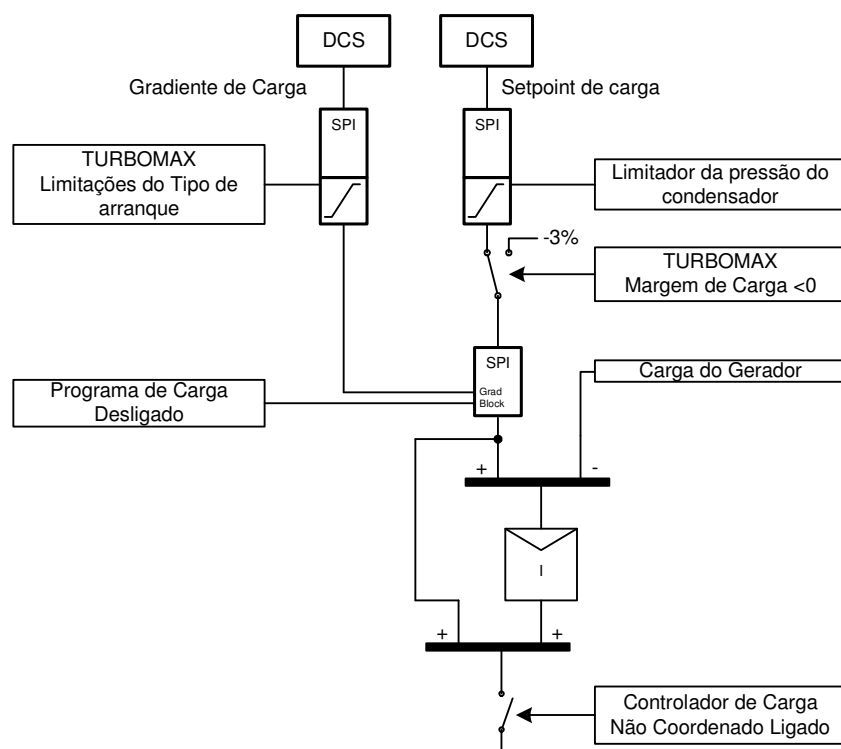


Figura 3: Controlador de carga não coordenado

O controlador pode ser colocado fora de serviço por ordem manual, por falha na medida de carga do gerador, ou pela entrada em funcionamento de outro controlador super imposto<sup>4</sup>.

<sup>2</sup> Função que vigia o *stress* térmico da turbina.

<sup>3</sup> O tipo de arranque é determinado pela temperatura do rotor da turbina.

<sup>4</sup> No sistema de controlo da turbina existem 3 controladores super impostos: controlador de não coordenado, controlador de carga coordenado, e o controlador de pressão de vapor sobreaquecido.

## Controlo de carga coordenado

Durante a subida de carga feita através do controlador de carga não coordenado, é o *bypass* de alta pressão que controla a pressão no sobreaquecedor. Assim que este fecha totalmente, isto é, todo o vapor produzido é entregue à turbina de alta, dá-se o início do controlo coordenado, sendo colocado em serviço o controlador de carga coordenado.

O controlo de carga coordenado tem como objetivo manter a carga no seu valor pretendido, mas tendo em atenção a pressão na caldeira. O desvio de pressão do vapor vivo é subtraído ao *setpoint* de carga, segundo a curva indicada na Figura 4, fazendo com que o controlador de carga altere a posição das válvulas de regulação para assim eliminar o erro de pressão. Por exemplo, no caso de pressão excessiva o controlador irá abrir mais as válvulas de regulação, absorvendo o excesso de vapor existente. No caso de falta de pressão, a ordem é para fechar as válvulas aumentando assim a pressão no sobreaquecedor.

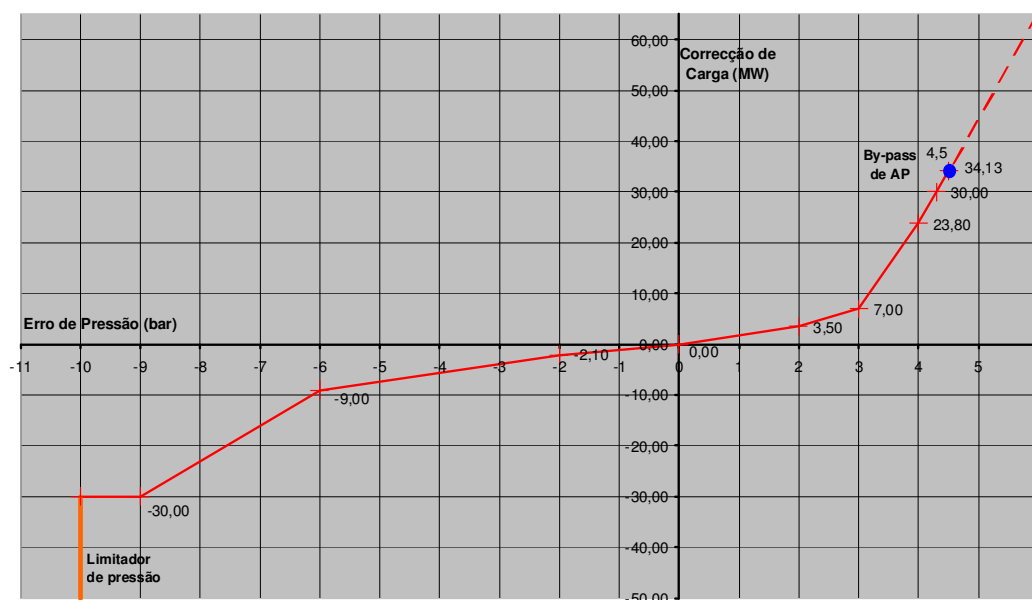


Figura 4: correção do pedido de carga em função do erro de pressão [4]

O ponto azul na Figura 4 indica que o controlo de pressão passa a ser efetuado pelo *bypass* de alta pressão. Nesta situação o controlo passa a não coordenado.

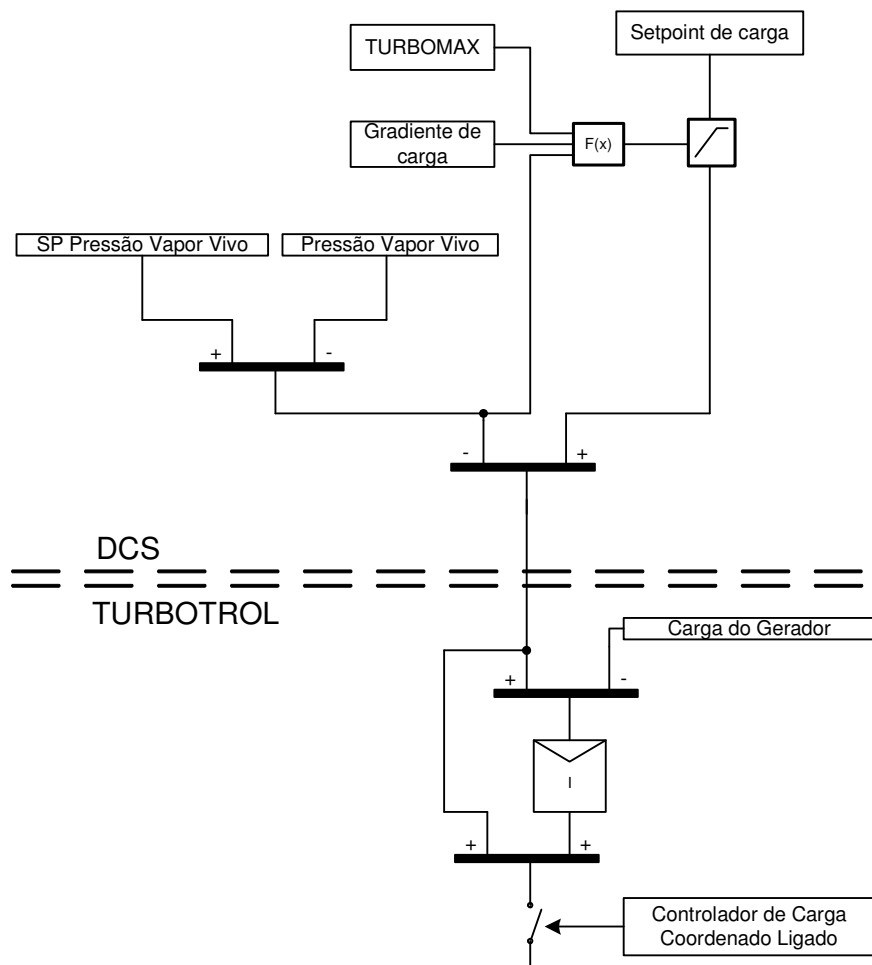


Figura 5: Controlador de carga coordenado

A Figura 5 indica a estrutura do controlador de carga coordenada, desde o cálculo do *setpoint* de carga influenciado pelo erro de pressão de vapor na caldeira até ao controlador de carga propriamente dito. O gradiente de carga, no caso do controlador de carga coordenado, é também definido pelo operador, sendo afetado pelo Turbomax. A diferença é que neste, o erro de pressão do vapor também altera o seu valor, podendo aumentar o seu valor no caso de pressão excessiva, ou reduzi-lo quando a pressão é inferior ao seu *setpoint*.

## 2.3. Gerador

O gerador converte energia mecânica em energia elétrica. Esta energia mecânica é fornecida pela turbina a vapor que está diretamente acoplada ao eixo do gerador.

O gerador [5] é constituído pelas chumaceiras, rotor e estator.

O estator está fixo numa estrutura montada num maciço apoiado em molas, de modo a permitir que esta estrutura expanda e contraia do centro para ambas as extremidades

horizontalmente. O estator tem os enrolamentos embutidos e estão ligados aos terminais do gerador que estão localizados na sua parte inferior.

O rotor de enrolamentos embutidos é unido à turbina a vapor por acoplamentos rígidos.

A estrutura de encapsulamento do estator juntamente com o rotor e as chumaceiras de selagem estão concebidas para aguentar a pressão do  $H_2$ , que é utilizado para arrefecimento do gerador.

O hidrogénio é utilizado com o objetivo de arrefecer o interior e os enrolamentos do estator, assim como o rotor. O  $H_2$  depois de aumentar a sua temperatura no interior do gerador, atravessa os permutadores a água onde dissipa a temperatura.





# Capítulo 3

## Sistema de excitação

### 3.1. Visão geral do Sistema

A função do sistema de excitação é estabelecer uma corrente controlada nos enrolamentos do rotor. Esta corrente é a responsável pela criação do fluxo magnético, que através do movimento de rotação do rotor, fornecido pela turbina, vai induzir tensões no estator.

O sistema de excitação estática regula a tensão e a potência reativa aos terminais do gerador, através do controlo direto da corrente de campo via conversor de tiristores [6].

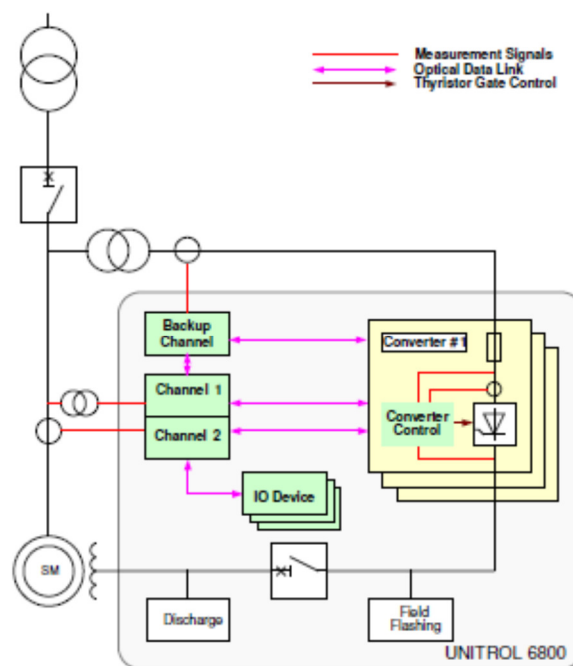


Figura 6: Vista Geral do sistema de excitação [6]

Na Figura 6 está indicada a vista geral típica de um sistema de excitação. Este sistema é do tipo autoalimentado, isto é, é alimentado diretamente pela saída do gerador.

A cor verde identifica o sistema de controlo. O núcleo do sistema de controlo é constituído pelo canal 1 e 2 juntamente com o canal de *backup*.

A principal função dos canais de controlo é controlar a tensão em cadeia fechada.

O módulo de I/O tem como objetivo adquirir e trocar sinais, analógico e binários, com o sistema de controlo da central.

O módulo de controlo do conversor atua como um *interface* entre o sistema de controlo e o conversor.

## 3.2. Descrição do diagrama unifilar

A Figura 7 ilustra a constituição de um sistema de excitação típico.

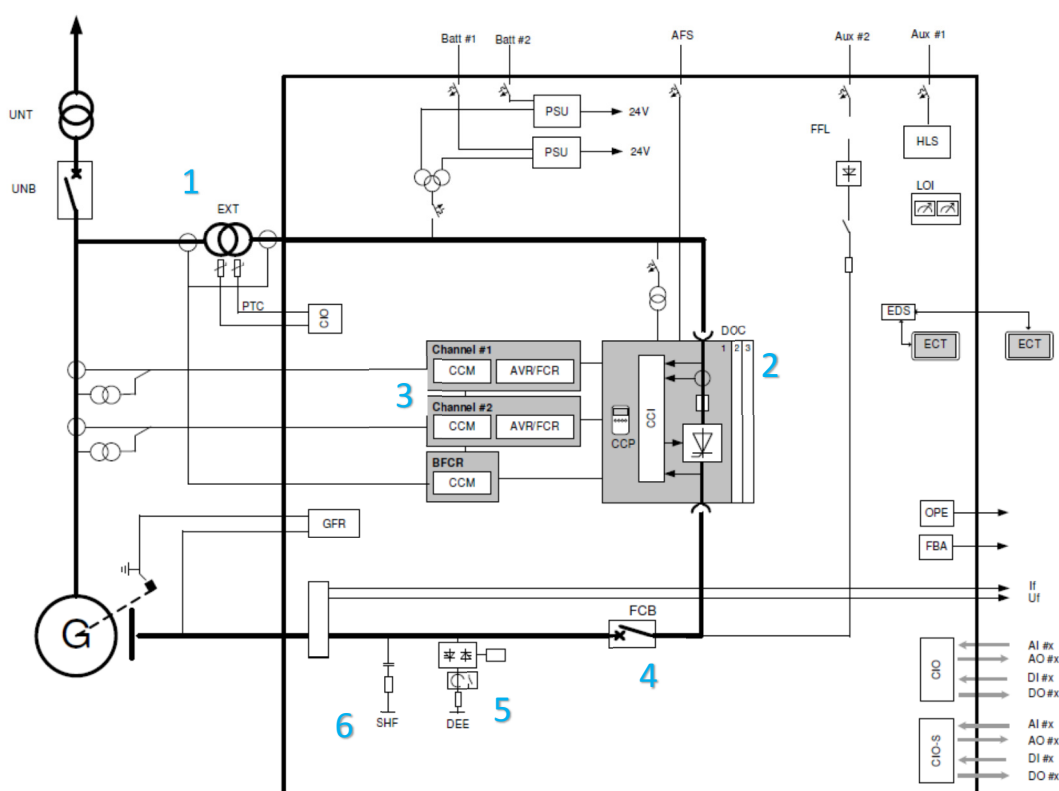


Figura 7: Diagrama de blocos típico de um sistema de excitação [6]

O sistema na sua globalidade pode ser dividido em sete blocos principais:

1. Transformador de excitação
2. Conversores

3. Controladores
4. Disjuntor de campo
5. Excitação inicial (*Field Flashing*)
6. Circuito de supressão de campo

Nos sistemas de excitação estáticos (denominados de *shunt excitation*) a alimentação para o sistema de excitação é retirada dos terminais do gerador. A corrente de campo do gerador atravessa o transformador de excitação, os conversores de potência e o disjuntor de campo.

### 3.3. Transformador

---

O transformador da excitação faz o abaixamento da tensão do gerador, para a tensão de alimentação dos conversores. Providencia também isolamento galvânico entre o gerador e o secundário do transformador e atua ao mesmo tempo como uma reatância de comutação para os conversores. Através do retificador a corrente AC é convertida em corrente CC, controlando também a sua intensidade.

### 3.4. Excitação inicial

---

Toda a sequência de arranque é controlada e monitorizada pelos canais de controlo. A excitação inicial não é mais que um sistema de *backup*/auxiliar para iniciar a excitação no caso de não estar presente qualquer tensão aos terminais do gerador. O circuito de excitação inicial é composto por uma resistência de limitação de corrente, um diodo e um contactor. Está concebido para atingir os 10 a 20V necessários para que a função normal de arranque suave possa entrar em serviço.

### 3.5. Controladores

---

Depois de sincronizar com a rede, o sistema de excitação funciona normalmente em regulação de tensão (AVR) se estiver em automático (AUTO), controlando a tensão aos terminais do gerador. Além disso o regulador pode ser incorporado numa malha de controlo de potência reativa.

O AVR pode funcionar em um dos dois modos super impostos

- Controlo de FP
- Controlo de potência reativa

A entrada em funcionamento dos controladores super impostos é decidida pelo operador, não podendo ser colocados em funcionamento simultaneamente. Quando em funcionamento, estes controladores funcionam em cascata com o controlo automático de tensão, as suas saídas passam a ser o principal valor de referência para o AVR.

Em modo manual o sistema de excitação controla a corrente de campo através do regulador de corrente de campo (FCR). Este modo de funcionamento é utilizado em comissionamento ou por motivos de manutenção.

Neste tipo de sistema de excitação, os dispositivos de controlo podem ser configurados como canal simples (canal 1), duplo canal (canal 1 e 2) ou tripo canal (canal 1, 2 e *backup*). Um canal de controlo é compreendido pelo módulo de controlo, que contem o AVR e FCR, programados no AC 800PEC e o módulo de I/O. Todos estes dispositivos formam um canal de controlo independente.

Cada canal contém:

- O *Software* para o controlo automático de tensão e corrente;
- Funções de monitorização e proteção;
- Um controlador de lógica programável

O canal denominado de *backup* é utilizado apenas para controlo de corrente de campo, o que corresponde ao funcionamento manual do sistema de excitação. Neste modo de funcionamento são reduzidas as funções de proteção e monitorização.

No sistema de excitação em estudo, o esquema de controlo instalado é de canal duplo, não existindo o canal de *backup*.

### **3.6. Circuito de supressão de campo**

---

O Circuito de Supressão de Campo (*Field Suppression Circuit*) é constituído pelo disjuntor de campo, a resistência de supressão de campo e o Tiristor *Crowbar* com a respetiva eletrónica de disparo associada.

A resistência de supressão é dimensionada tendo em conta o arco elétrico originado do disjuntor de campo (FCB), assim como a máxima tensão admissível nos enrolamentos de campo. É também dimensionada para absorver e suprimir energia acumulada nos enrolamentos de campo, devido à corrente de campo induzida por um curto-circuito trifásico nos terminais do gerador.

A descarga da energia começa assim que a excitação receba ordem para desligar e de seguida o disjuntor de campo para abrir, isto se a excitação for desligada pelo processo normal. No caso de um disparo, a ordem de desligar a excitação é externa, tendo origem no sistema de controlo da central, e a sequência de desligar a excitação é diferente, sendo dada ordem de abertura ao disjuntor de campo. Ao abrir o disjuntor de campo é invertido o funcionamento do

conversor e acionado o tiristor *Crowbar*. No início, o processo de supressão de energia é fortemente suportado pelo funcionamento inverso do conversor.

## 3.7. Funções de controlo

---

O principal objetivo do controlo automático de tensão (AVR) é controlar de forma precisa a tensão aos terminais do gerador e a potência reativa. Para o sistema ser capaz de responder a rápidas variações das condições de operação, o tempo de resposta deste sistema é da ordem dos milissegundos.

### 3.7.1. Controlo automático de tensão (AVR)

---

A Figura 8 indica uma visão global do AVR do sistema de excitação. É possível verificar que o controlo de tensão do gerador é efetuado por um controlador PID, e que o *setpoint* de tensão é afetado por uma série de funções.

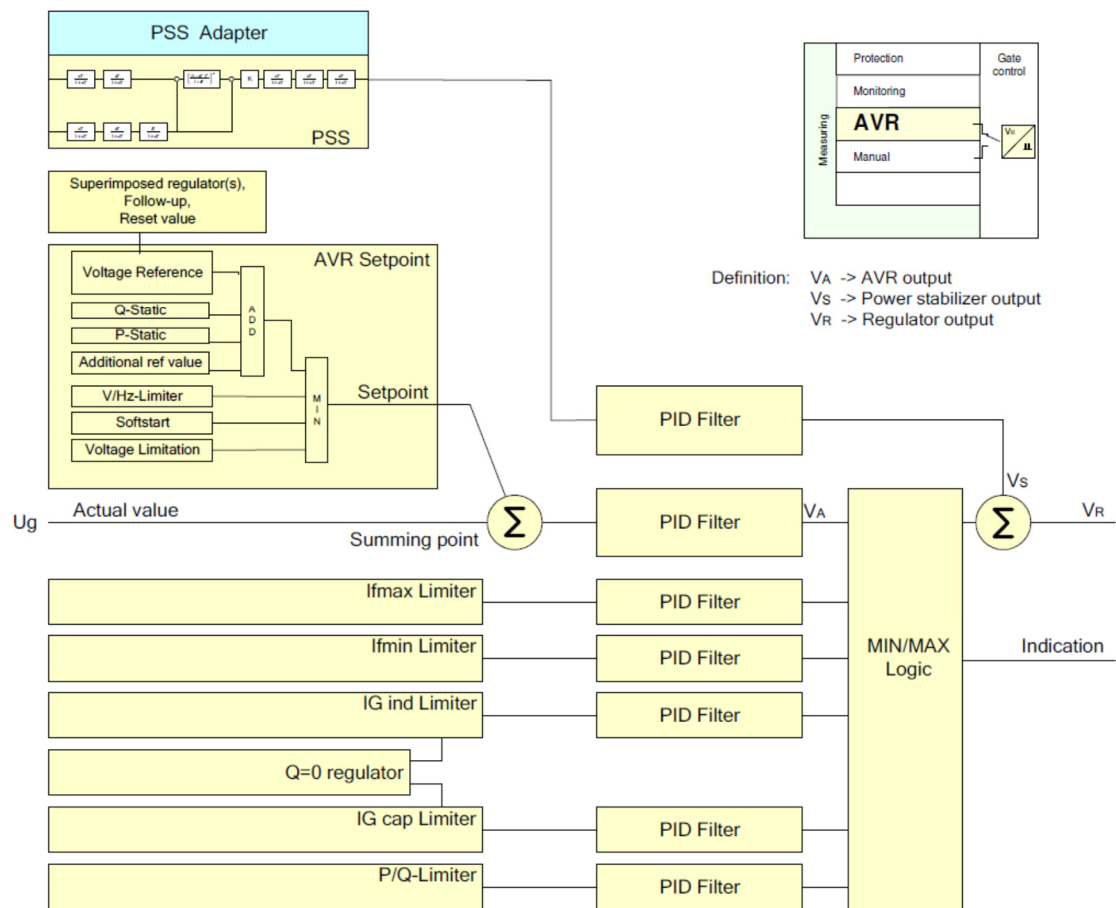


Figura 8: Diagrama de blocos do AVR [6]

### 3.7.1.1. Valor de referência para o AVR

O *setpoint* do controlador de tensão é influenciado por várias subfunções como limitadores, potências ativa e reativa, rampa suave de subida de tensão e controladores super impostos.

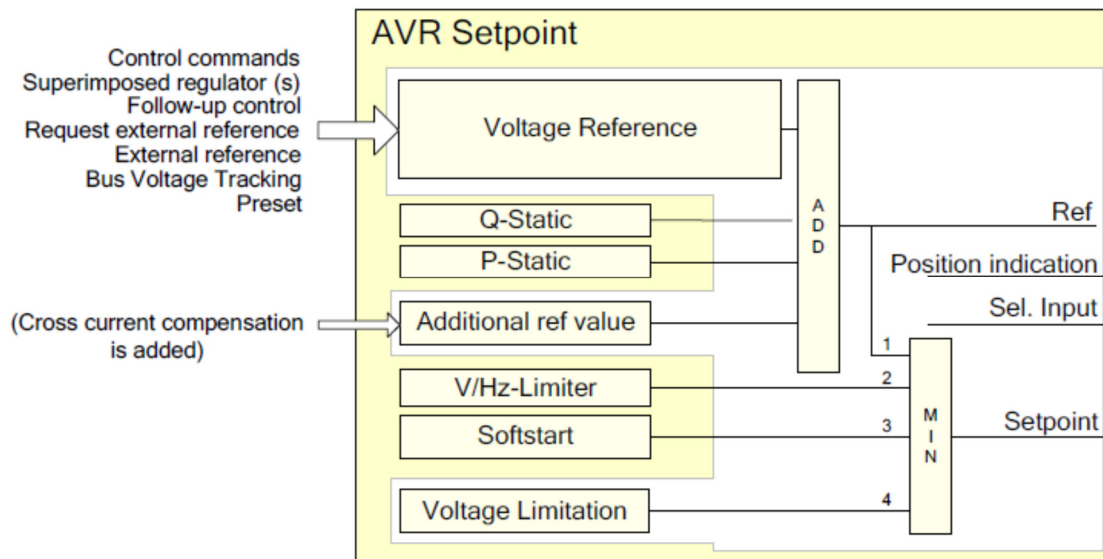


Figura 9: Função do *setpoint* de tensão [6]

### 3.7.1.2. Referência de tensão

A tensão de referência é ajustada entre o seu valor máximo e mínimo, isto é feito através dos comandos de controlo de subida ou descida de tensão, da saída dos controladores superimpostos, ou por funções de seguimento, como por exemplo, uma referência externa.

Uma das funções de seguimento é o “seguimento da tensão do barramento”, neste caso o *setpoint* do AVR segue a tensão do barramento mas apenas enquanto não estão sincronizados. As seguintes condições desligam o “seguimento da tensão de barramento”:

- Perda do valor de tensão do barramento
- Gerador sincronizado
- Comando de subida ou descida de tensão fornecidos pelo sincronizador
- Comando para desligar a função de seguimento de tensão do barramento

### Compensação de potência reativa/ativa

Os sinais *Q-Static* e *P-Static* são adicionados ao *setpoint* de tensão de modo a compensar a queda de tensão provocada pela corrente que atravessa o transformador principal.

A Figura 10 e a Figura 11 ilustram o modo como são calculados estes sinais.

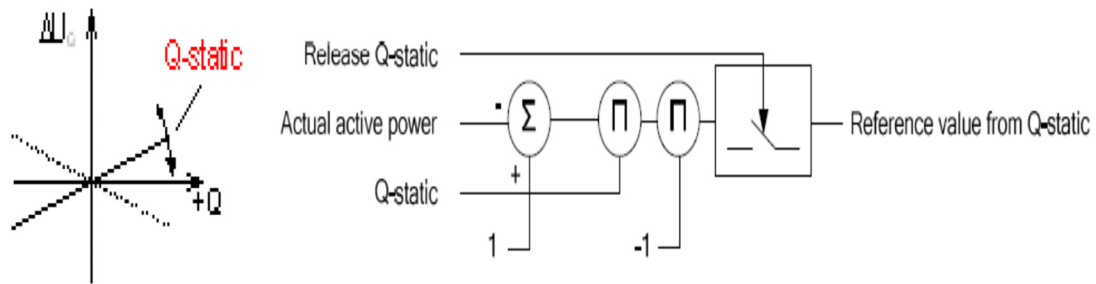


Figura 10: Q-Static

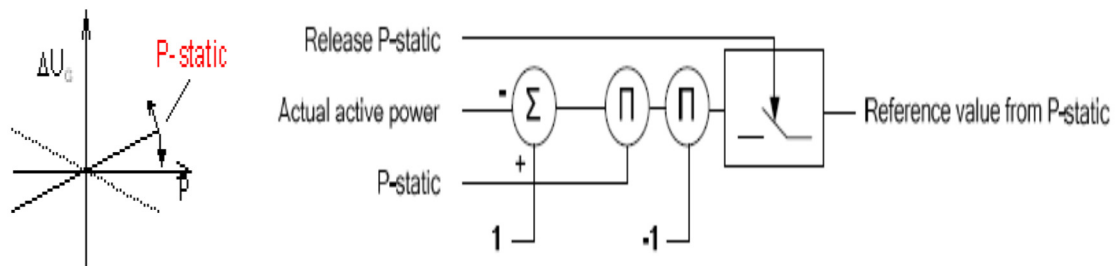


Figura 11: P-Static [6]

O compensador *Q-Static* também altera o valor da tensão no momento do paralelo com a rede, ajustando a potência reativa.

### Valor adicional de referência

O valor adicional pode ser utilizado na realização de testes com respostas a variações em escalão do valor de referência da tensão, ou para compensar a corrente num sistema de geradores em paralelo, com o objetivo de repartir a carga reativa por todos os geradores.

### Limitador V/f

Partindo da lei geral da indução ( $e = -\frac{d\phi}{dt}$ , em que  $e$  é a força eletromotriz induzida e  $\phi$  o fluxo), sabe-se que a tensão é proporcional à frequência e ao fluxo:

$$V \propto \omega \phi \quad (1)$$



Que de forma equivalente, corresponde a:

$$\phi \propto \frac{V}{f} \quad (2)$$

Do ponto de vista do funcionamento otimizado da máquina com fluxo constante o binário é também máximo, evitando-se, por exemplo, que as perdas por histerese e correntes de fuga aumentem no caso em que a tensão se mantém constante e a frequência diminuiu. Esta situação potencia ainda um aquecimento do núcleo. As situações em que um fenómeno deste tipo pode ocorrer são o arranque, a paragem ou em funcionamento isolado do gerador.

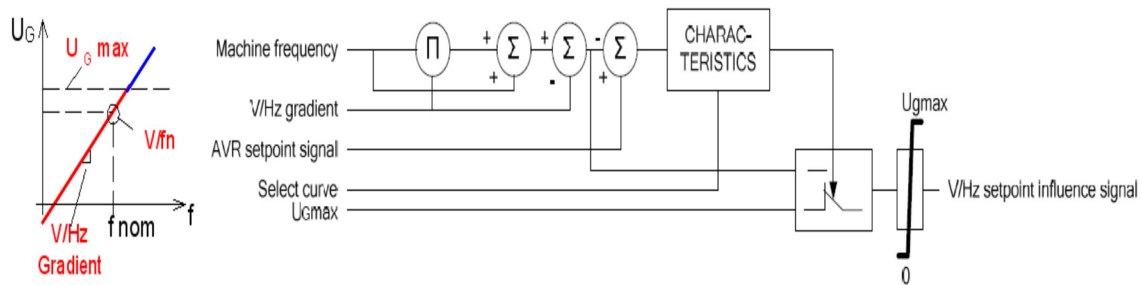


Figura 12: Limitador V/f

Desta forma, o limitador de tensão/frequência está concebido para evitar sobre fluxos no gerador e no transformador de excitação. Em determinadas frequências se a tensão do gerador for muito elevada, o valor do *setpoint* de tensão será suavemente diminuído segundo uma curva característica. Este limitador, ao baixar o valor da tensão do gerador, evita a saturação do gerador e do transformador de excitação através de frequências mais baixas.

## Arranque suave

O arranque suave da excitação atua na subida de tensão aos terminais do gerador, fazendo com que esta aumente segundo um determinado gradiente, evitando assim uma sobre tensão.

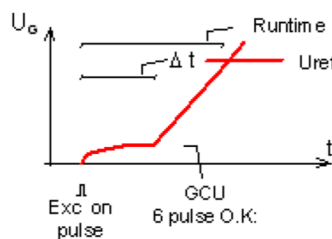


Figura 13: Arranque suave [6]

Após o sistema de excitação ser ligado, a tensão do gerador é elevada até cerca de 10% do seu valor nominal por meio da “excitação inicial”. Assim que o valor de 10% seja atingido, é

iniciada a subida de tensão, respeitando um determinado gradiente, até que a tensão do gerador atinja o valor de *setpoint*. Esta subida suave da tensão até ao seu valor inicial está indicada na Figura 13.

O tempo de subida de tensão está limitado a um tempo mínimo de 1 segundo.

### **Limitação de tensão**

O valor máximo que o *setpoint* de tensão pode atingir são os 110% da tensão nominal, neste caso os 19800V.

## **3.7.2. Limitadores do AVR**

---

Durante o funcionamento do gerador é necessário garantir o seu correto funcionamento. Para isso, os canais de controlo têm programados vários limites de modo a evitar que o gerador funcione em regimes de carga excessiva, mantendo-o dentro de limites definidos no diagrama de potência.

Estes limitadores são controlados por controladores PID independentes, que atuam na saída do regulador automático de tensão, de modo a evitar disparos desnecessários durante o funcionamento normal.

Para uma situação de subexcitação existem os seguintes limitadores:

- Limitador PQ
- Limitador de mínima corrente de campo
- Limitador de corrente do estator subexcitado

Para uma situação de sobreexcitação existem os seguintes limites:

- Limitador de corrente no estator sobreexcitado
- Limitador de corrente máxima de campo

Estes limites estão indicados no diagrama de potência indicado na Figura 14, onde no eixo das ordenadas está indicado a potência reativa e no eixo das abcissas a potência ativa.



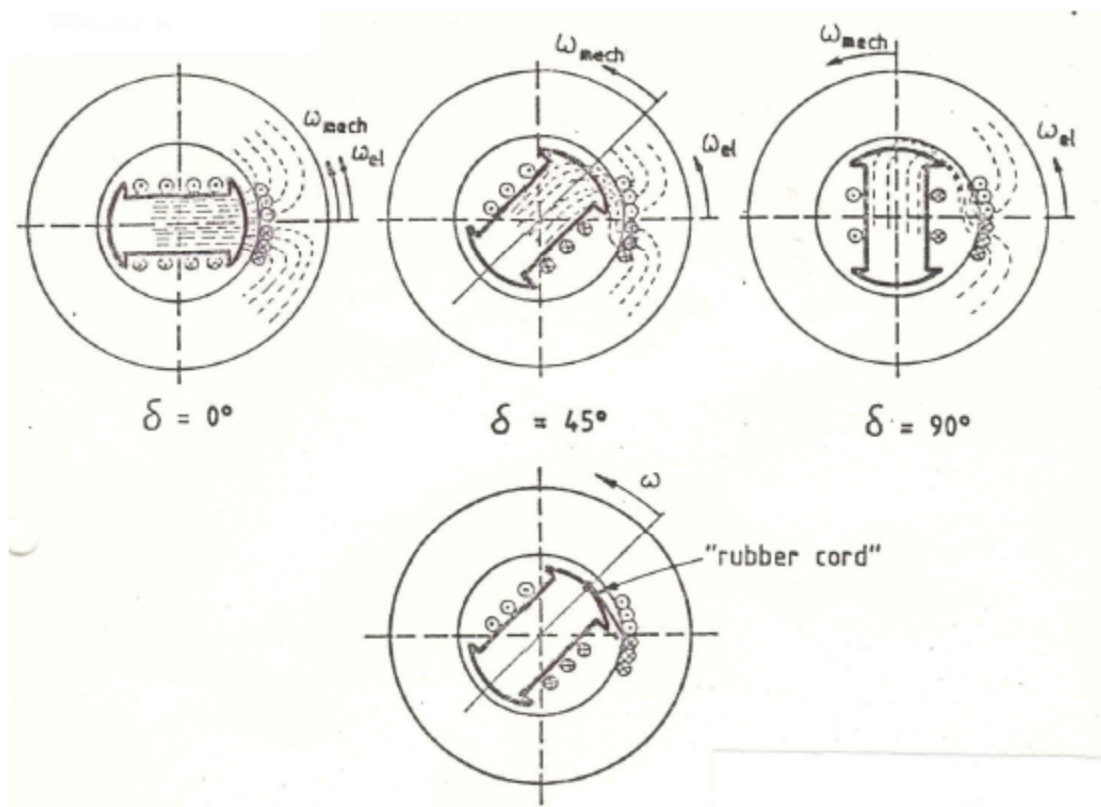


Figura 15: Correspondência física do ângulo polar [7]

Numa situação de funcionamento normal considera-se que este valor não deverá ultrapassar os 70°, mas com a presença deste limitador é possível funcionar em segurança até cerca dos 80°, pois para além deste valor o limitador P/Q fica ativo subindo a corrente de excitação, o que terá como consequência a subida da potência reativa fazendo com que o gerador trabalhe num ponto mais afastado do lado esquerdo do diagrama de potência.

- **Limitador de corrente de campo mínima**

Este limitador tem como objetivo evitar a perda de sincronismo com a rede. Uma corrente baixa no rotor provoca um fluxo magnético baixo, o que poderá ter como consequência a perda de sincronismo. Este limitador, tal como no limitador anterior, ao ficar ativo atua diretamente na saída do AVR, tendo uma ação direta sobre a corrente do rotor com o objetivo de a aumentar.

- **Limitador de corrente no estator**

A função do limitador de corrente do estator é garantir que esta não ultrapassa o valor máximo admitido. No caso de o gerador estar subexcitado, o limitador, que atua na saída do AVR, irá aumentar a corrente de campo de modo a que o gerador funcione num ponto mais à direita do diagrama de potência, afastado do limite de subexcitação. No caso de funcionamento em sobre excitação, atua igualmente na corrente mas no sentido de a diminuir, afastando o gerador, para um ponto mais à esquerda do diagrama de potência, do limite de sobreexcitação.

Na situação do gerador estar a funcionar num ponto em que a potência reativa é praticamente zero, isto é, a carga é maioritariamente resistiva, e a turbina esteja a fornecer um binário elevado que leve a que a corrente do estator ultrapasse o seu limite, não faz sentido ativar qualquer um dos limitadores de corrente no estator, pois estes apenas atuam sobre a corrente do rotor e não na potência ativa fornecida pela turbina.

- **Limitador de corrente de campo máxima**

O objetivo do limitador de corrente de campo máxima é evitar que esta ultrapasse o valor máximo admitido pelos enrolamentos do rotor, evitando que estes se degradem, ou num caso extremo se fundam, por ação térmica provocada pelo excesso de corrente. O limitador, à imagem dos limitadores anteriores, atua na saída do AVR diretamente na corrente do rotor, diminuindo-a.

### 3.7.3. Controladores super impostos

---

Para além do controlo de tensão automático, o sistema de excitação tem 3 controladores super impostos, que funcionam em cascata com o AVR alterando o seu *setpoint*, como indicado na Figura 16. Estes controladores são o controlo de potência reativa, o controlador de  $\cos\phi$  e a função de redução de potência reativa ( $Q=0$ ).

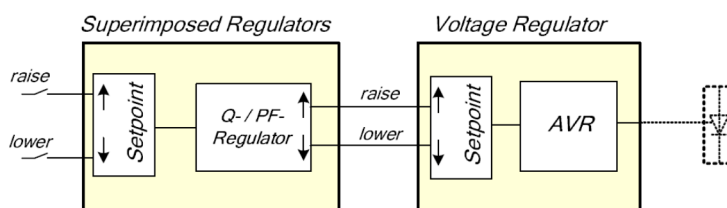


Figura 16: controladores super impostos [6]

### 3.7.3.1. Controlador de potência reativa

---

Com o controlador super imposto de potência reativa ativo fica disponível para o operador o *setpoint* de potência reativa. O controlador calcula a diferença entre o valor desejado e o valor atual de potência reativa e, com o resultado obtido, varia o *setpoint* de tensão do AVR.

O modo como este controlador atua é visível no diagrama de potência indicado na Figura 17.

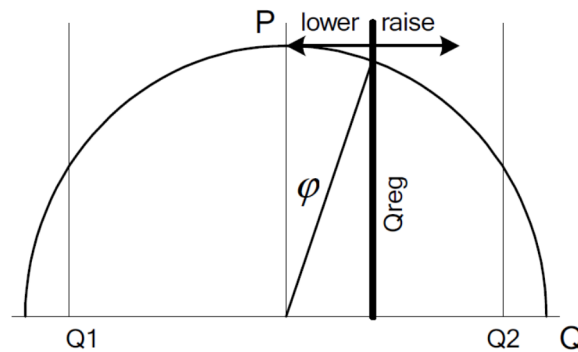


Figura 17: Ação do *setpoint* na potência reativa [6]

### 3.7.3.2. Função de descarga de potência reativa

---

A função de redução de potência reativa é um caso particular do controlador de potência reativa. Durante o processo de retirar o gerador da rede, tanto a potência ativa como a reativa são reduzidas para o menor valor possível. Esta função fica ativa no momento em que a excitação recebe o sinal externo  $Q=0$  que solicita que a potência reativa seja colocada a 0MVar.

### 3.7.3.3. Controlador de Fator de Potência

---

Para se colocar este controlador em funcionamento é necessário que a potência reativa esteja disponível, isto porque o controle de fator de potência é efetuado utilizando o controlador super imposto do controlador da potência reativa.

Quando este controlador está em funcionamento o *setpoint* introduzido pelo operador é o valor de referência para o  $\cos \phi$ , como indicado na Figura 18. Com o valor de  $\cos \phi$  introduzido é calculado o valor da potência reativa que é necessária.

Após o cálculo da potência reativa correspondente ao ângulo pretendido, tendo em conta a potência ativa, é utilizada a cadeia do controlo da potência reativa, em que o erro utilizado para o controlo é o erro de potência reativa, a diferença entre a reativa real e a calculada.

O modo como este controlador atua é visível no diagrama de potência indicado na Figura 18.

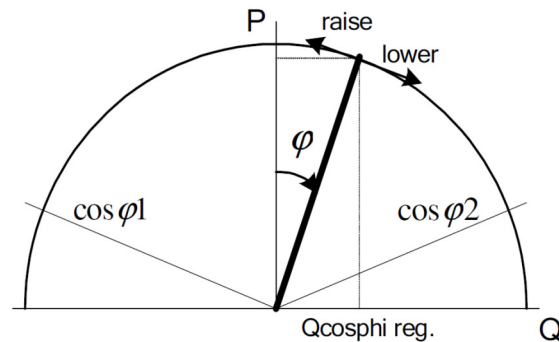


Figura 18: Ação do ponto de funcionamento no  $\cos\phi$  [6]

### 3.8. Falhas no circuito da excitação

---

São várias as causas que levam à falha parcial ou total de um semicondutor de potência. Causas como transitórios no retificador, falhas nos circuitos de controlo e proteção podem conduzir à sua destruição.

Os semicondutores quando atingem o estado de falha total podem comportar-se como um circuito fechado ou circuito aberto. No caso de circuito fechado o semicondutor irá comportar-se como um curto-circuito, o que terá como consequência a atuação do fusível de proteção que está montado em série com o semicondutor. Nestes casos, uma avaria de circuito fechado passa a uma avaria de circuito aberto.

Um dos casos que leva à degradação do semicondutor é o aumento brusco da corrente aplicada na *gate* [8]. Este efeito  $di/dt$  provoca uma elevação da temperatura da área da *gate*, que tem como consequência a criação de um caminho preferencial, não circulando a corrente de forma homogénea no interior do semicondutor. Este caminho preferencial causa no ânodo e no cátodo o aparecimento de pontos quentes.

Um dano igualmente bem definido localmente no tiristor pode também ser causado por uma sobretensão. Nesta situação o tiristor fica sujeito a uma elevada tensão entre o ânodo e o cátodo mas não é atravessado por nenhuma corrente. Este fenómeno é geralmente provocado por transitórios.

O mesmo tipo de fenómeno pode levar o transistor à condução, o que terá como efeito uma elevada corrente a atravessar o semiconductor, isto é, ficará sujeito a um fenómeno de sobretensão e seguidamente de sobrecorrente, levando-o à destruição.

Falhas nos enrolamentos do rotor não são facilmente identificáveis. No caso de curto-circuitos entre espiras, a consequência é a diminuição do fluxo magnético e consequente decréscimo da tensão nos terminais do gerador. A diminuição da tensão é compensada pelo AVR, que irá aumentar a corrente de excitação que por sua vez aumenta o fluxo magnético. Este tipo de falhas é detetado comparando os valores nominais de tensão e corrente, mas estão fora do âmbito deste trabalho.



# Capítulo 4

## Técnicas de diagnóstico em conversores eletrônicos de potência

---

### 4.1. Introdução

---

Com o desenvolvimento da eletrônica de potência o seu uso cresceu largamente na indústria, na geração de energia, nos transportes, etc. Em muitas aplicações é exigido um constante arranque e paragem, rápidas mudanças de velocidade entre outras solicitações severas para os equipamentos, levando-os a falhar.

Com o objetivo de se obter dos equipamentos a mais alta taxa de utilização possível, ter curtos períodos de paragem aumentando a sua disponibilidade para maximizar os ganhos, são atualmente desenvolvidos sistemas automáticos para monitorização do estado e deteção de falhas, tendo a capacidade de identificar o tipo de falha. Neste contexto, este capítulo apresenta os diversos tipos de falhas que podem ocorrer em conversores eletrônicos de potência do tipo inversores e retificadores. Também serão apresentadas os principais métodos de diagnóstico para a deteção e identificação dessas falhas.

## 4.2. Avarias e técnicas de deteção e retificadores

---

Hoje em dia um grande número de instalações/equipamentos são alimentados através de retificadores e o número de retificadores constituídos por tirístores tem vindo a impor-se aos retificadores constituídos por díodos.

A deteção e diagnóstico de avarias nestes equipamentos, com o objetivo de diminuir o seu tempo de indisponibilidade, é também de elevada importância. A maioria dos métodos existentes utiliza as correntes ou tensões, tanto da entrada como da saída do retificador, assim como a queda de tensão aos terminais dos semicondutores, para detetarem comportamentos anómalos através da comparação com padrões, verificando se as tensões ou correntes estão dentro dos limites normais de funcionamento.

As falhas nos retificadores de potência que condicionam o seu funcionamento podem ser do tipo direto, quando a falha está localizada no semicondutor, ou indireto, se estiver localizada no circuito de disparo. Os tirístores são semicondutores bastante fiáveis, verificando-se que a maioria das avarias nos conversores está localizada no circuito de disparo. Sendo a falha no tiristor ou no circuito de disparo, o comportamento do semicondutor é alterado, ficando, no pior caso, como um curto-circuito, se ficar permanentemente no estado de condução, ou como circuito aberto, se não voltar a conduzir.

As avarias verificadas nos tirístores, na maioria dos casos, são o curto-circuito, é também aquela que provoca as consequências mais graves. A consequência de um tiristor em defeito de circuito fechado é um curto-circuito entre fases, o que provocará a circulação de correntes muito superiores à corrente nominal. Se este tipo de avaria não for rapidamente interrompida provoca graves danos a todo o sistema. O modo de interromper rapidamente a propagação deste tipo de avaria é a instalação de proteções contra sobreintensidade. Para retificadores que possuam uma proteção de sobreintensidade global, o sistema é deligado assim que a corrente elevada é detetada, mas se esta proteção for individual para cada braço do retificador, ou mesmo para cada tiristor, este pode continuar em funcionamento, ficando fora de serviço apenas o braço, ou tiristor, que possui o defeito.

As avarias no circuito de disparo manifestam-se por meio dos impulsos na *gate* dos tirístores, como o impulso presente de forma constante, completa ausência de impulsos, ou pelo seu surgimento de forma intermitente. Mais uma vez estas avarias podem ser caracterizadas como circuito aberto ou curto-circuito.

Avarias como as acima descritas, ou outras como na alimentação ou saída dos conversores podem ser visualizadas tal como indicado na Figura 19.

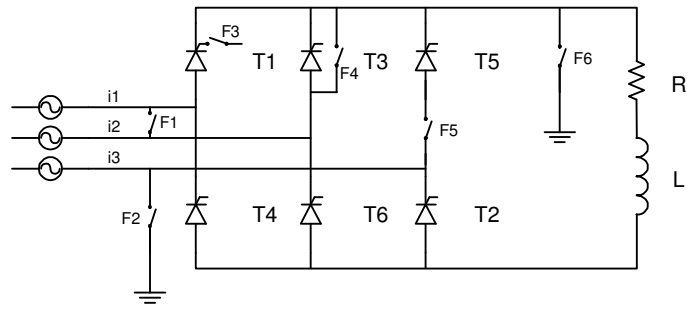


Figura 19: Possíveis falhas em retificadores

Os “F” simbolizam as várias avarias possíveis:

- F1 curto-circuito entre fases
- F2 passagem à terra no barramento AC
- F3 falha no circuito de disparo
- F4 curto-circuito num transístor
- F5 circuito aberto num transístor
- F6 passagem à terra no barramento CC

Para a deteção e diagnóstico de retificadores foram desenvolvidos vários métodos, como a análise da distorção das formas de onda da tensão [9], o método dos resíduos [10] que consiste em processar, paralelamente com o funcionamento do retificador, a simulação do próprio retificador e efetuar constantes comparações entre o resultado da simulação e a saída real do retificador de modo a detetar diferenças no comportamento. Este método, à semelhança dos seguintes, caracteriza-se por necessitarem de complexos circuitos de monitorização e pesados algoritmos de cálculo. As abordagens de obtenção da característica do espectro de potência da falha, como as transformadas de Fourier [11] ou a análise espectral [12], não podem ser aplicadas num grande número de casos. Outros métodos utilizados são o reconhecimento de padrões por redes neuronais [13][14], mas a sua implementação torna-se complicada em fase de projeto, tendo a rede neuronal, num grande número de casos, de ser treinada localmente para cada situação.

### 4.3. Avarias e técnicas de deteção em inversores

---

O inversor é alimentado por tensão contínua e cria uma tensão trifásica variável e frequência variável. Para isto utiliza 6 semicondutores instalados com a configuração de uma ponte trifásica. Esta configuração indicada na Figura 20.

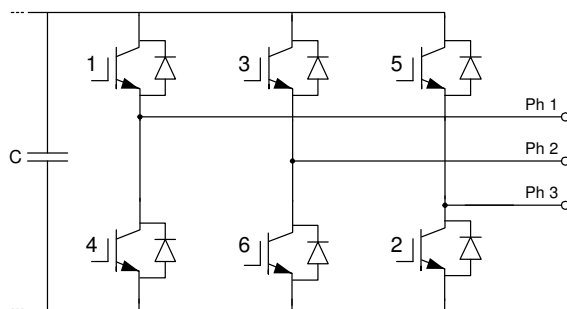


Figura 20: Esquema genérico de um inversor

O comando dos semicondutores é feito pelo PWM (*Pulse-Width Modulation*), que atua ajustando o tempo em que os semicondutores estão à condução e ao corte, isto é, a largura dos impulsos.

As avarias possíveis neste tipo de equipamentos são, na alimentação, nos semicondutores, as falhas de curto-circuito ou circuito aberto e no circuito de controlo, a falta de informação provocada por defeitos em sensores de corrente ou tensão, ou mesmo problemas nos sinais para as *gates* dos semicondutores.

Algumas destas falhas podem provocar a falha imediata do inversor, mas outras, como o circuito aberto no semicondutor, podem não provocar a falha imediata, podendo o equipamento funcionar por um determinado período de tempo com a falha presente, mas irá originar correntes e momentos pulsantes.

Tal como no caso dos retificadores, o defeito com piores consequências é o curto-circuito, originando elevadas correntes no barramento CC. As consequências deste tipo de defeito podem ser atenuadas com a inserção de proteções para a sobreintensidade de corrente. Novamente, estas proteções podem ser individuais para cada semicondutor, permitindo que o equipamento continue em funcionamento após a sua atuação transformando um defeito de curto-circuito num defeito de circuito aberto. No caso de proteções gerais, instaladas no barramento CC, leva a indisponibilidade imediata do equipamento em caso de atuação.

No circuito de controlo de disparos, os problemas podem ser os já mencionados acima, a falha nos sensores de tensão ou corrente, levando a que o circuito funcione de modo errado, ou podem ser a nível do sinal de disparo, em que o problema pode ser a sua presença constante, colocando o semicondutor sempre à condução, a sua completa ausência, levando o

semicondutor a comportar-se como um circuito aberto, ou de forma aleatória levando com que a largura dos impulsos esteja completamente errada.

Para a detecção e diagnóstico deste tipo de falhas foram desenvolvidas várias técnicas, como por exemplo, o método da corrente normalizada no barramento CC [15], o vetor Park's da corrente [16], método baseado no conhecimento [17], o desvio de corrente [18], método de análise dos principais componentes [19], o algoritmo *Wavelet-fuzzy* [20], método da rede neuronal *wavelet* [21], entre outros.



# Capítulo 5

## Detecção e diagnóstico no circuito de excitação

---

### 5.1. Introdução

---

Neste capítulo será apresentada uma nova abordagem para a detecção e identificação de falhas nos semicondutores de potência de um retificador trifásico em ponte utilizado para um sistema de excitação de um gerador síncrono. A abordagem para detecção e diagnóstico proposto neste trabalho para este tipo de avarias, será baseado no princípio do método de centro de massa [22].

Conforme se irá verificar, os principais defeitos verificados com tirístores são o circuito-aberto e circuito-fechado. O retificador do sistema de excitação tem como proteção contra curto-circuitos fusíveis em série com os tirístores. Os tirístores ao ficarem em defeito de circuito-fechado irão provocar um curto-circuito, fazendo com que os fusíveis se fundam e abram o circuito. Deste modo, os defeitos de circuito-fechado acabam por se comportar com circuito-aberto após a atuação da proteção. Neste trabalho os defeitos serão analisados sempre do ponto de vista de circuito-aberto. Para a identificação das falhas serão propostas duas abordagens baseadas no centro de massa. A primeira abordagem baseia-se na análise das correntes de entrada, enquanto a segunda irá utilizar a tensão de saída do retificador.

## 5.2. Detecção e diagnóstico pelo método centro de massa das correntes de alimentação

O circuito de excitação do gerador síncrono utiliza um retificador trifásico em ponte semi-comandado a tiristores. Na Figura 21 é apresentado o circuito de potência do referido retificador. Para simular a carga foi utilizada uma resistência e uma bobine com  $0,1\Omega$  e  $0,005H$  respetivamente.

De modo a analisar e estudar o sistema proposto para a deteção e diagnóstico de falhas de semicondutores de potência do retificador, o sistema de excitação do gerador foi simulado através do *software Matlab/Simulink*.

O retificador implementado é o indicado na Figura 21. Os tiristores estão denominados de T1 a T6.

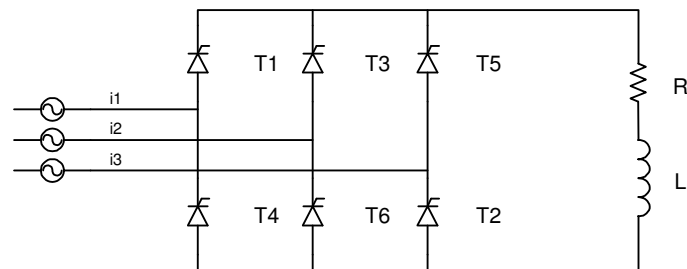


Figura 21: Circuito retificador

O controlador de tensão no barramento CC utilizado nos ensaios tem como função ajustar a tensão através do ajuste do ângulo de disparo  $\alpha$  dos tiristores. A Figura 22 indica através do diagrama de blocos o princípio de funcionamento desta cadeia de controlo em malha fechada.

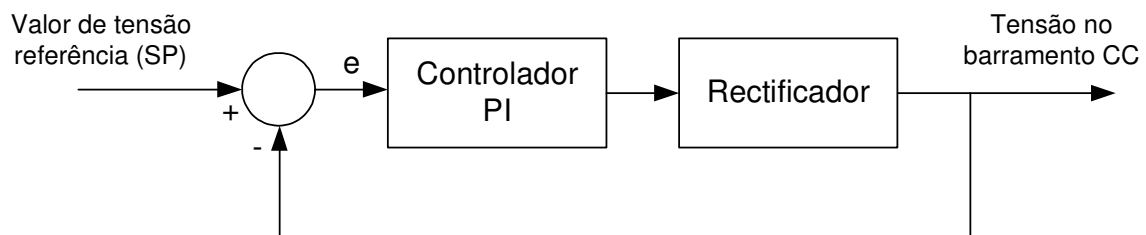


Figura 22: Diagrama de blocos da cadeia de controlo da tensão CC

Para implementar esta cadeia de controlo em *Simulink* foi elaborado um controlador (Figura 23) que regula a tensão contínua à saída do retificador. A Tensão de saída do retificador (PV) é comparada com o valor desejado de tensão (SP), o erro resultante é entregue ao controlador Proporcional Integral (PI) que tem como saída o ângulo de disparo ( $\alpha$ ). A constante de 140 apresentada é o valor de tensão desejada à saída do retificador. O bloco Alvo-SP tem como



função efetuar uma subida suave da tensão durante o arranque da excitação, evitando deste modo uma sobrelevação da tensão quando esta atingir o valor desejado. A entrada Alvo é utilizada na simulação descrita no ponto 5.3.5 onde são efetuadas várias alterações no valor desejado. A variação deste valor está programada no exterior do bloco do controlador que está indicado na Figura 23.

O ajuste dos parâmetros do controlador foram efetuados através da aplicação das regras de Ziegler-Nichols.

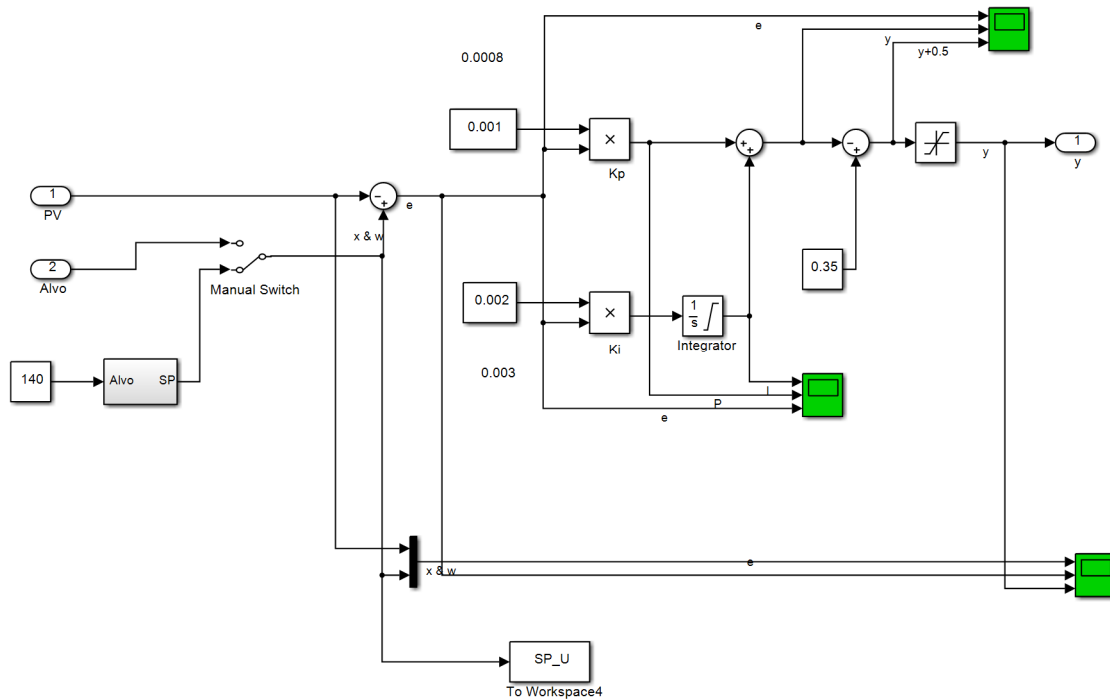
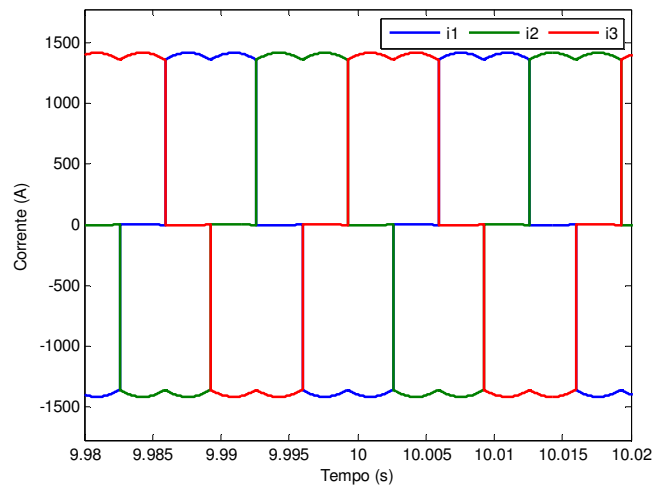


Figura 23: AVR Simulink

O ângulo de disparo é entregue ao comparador do gerador de impulsos que compara o  $\alpha$  com os ângulos das tensões compostas. O impulso de cada tiristor é gerado quando o ângulo de disparo  $\alpha$  for superior ao ângulo da respetiva tensão composta.

Foi utilizado um circuito PLL para o sincronismo das tensões compostas com a rampa que provoca o disparo dos tirístores.

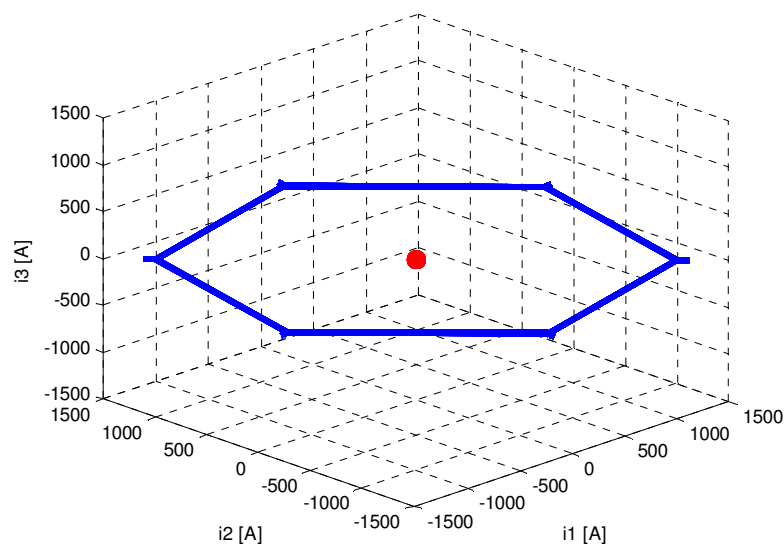
Em funcionamento normal as correntes de alimentação do retificador estão equilibradas. Estas correntes podem ser visualizadas através de um gráfico bidimensional, em que o eixo das ordenadas é o tempo e o eixo das abcissas é a amplitude das correntes.



**Figura 24: Representação bidimensional das correntes trifásicas de alimentação**

Estas correntes de alimentação trifásicas podem ser representadas num referencial de 3 dimensões, em que os seus eixos são as correntes  $i_1$ ,  $i_2$  e  $i_3$ .

Esta representação tridimensional das correntes trifásicas de alimentação do retificador, representada na Figura 25, gera um hexágono com o seu centro na origem dos 3 eixos. Este centro é denominado de centro de massa.



**Figura 25: Representação 3D das correntes de alimentação**

O aparecimento de um defeito de circuito-aberto, por exemplo no tiristor 1, provoca um desequilíbrio de correntes, deixando a corrente  $i_1$  de ter ciclo positivo. Este comportamento pode ser observado na figura abaixo.

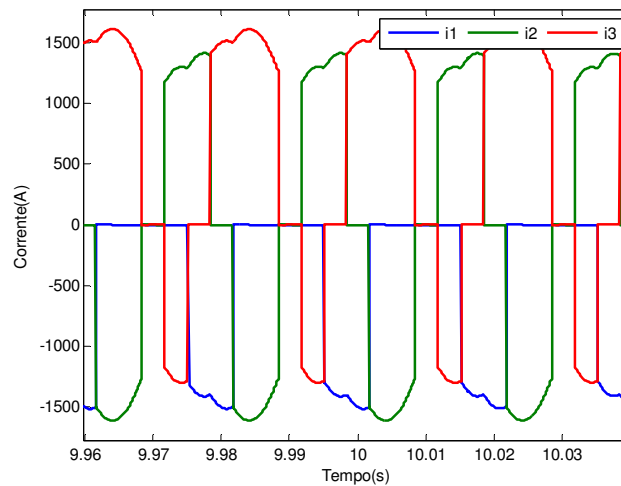


Figura 26: Forma de onda das correntes com defeito em T1

Na representação trifásica das correntes verifica-se que uma deformação no hexágono provoca um deslocamento do centro de massa (Figura 27).

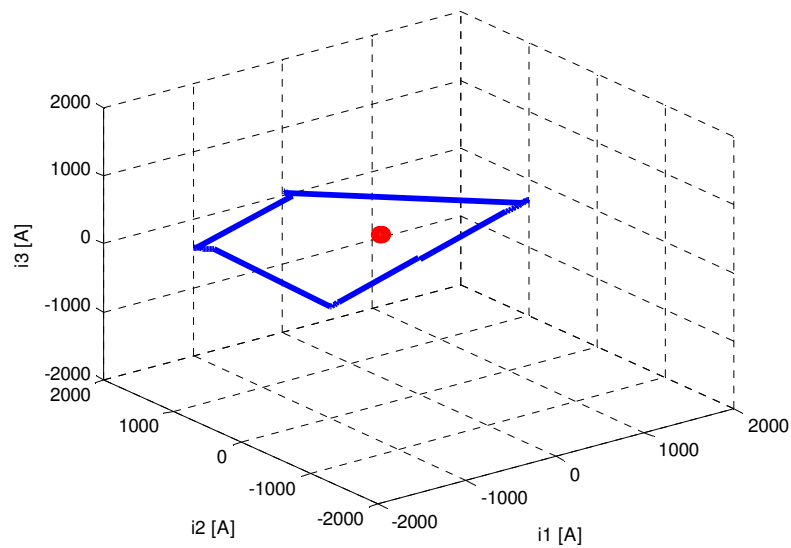


Figura 27: Deformação do hexágono e consequente deslocação do centro de massa

Pode-se observar que o centro de massa deslocou-se para a parte negativa do eixo da corrente i1. Esta deslocação está também representada na figura abaixo.

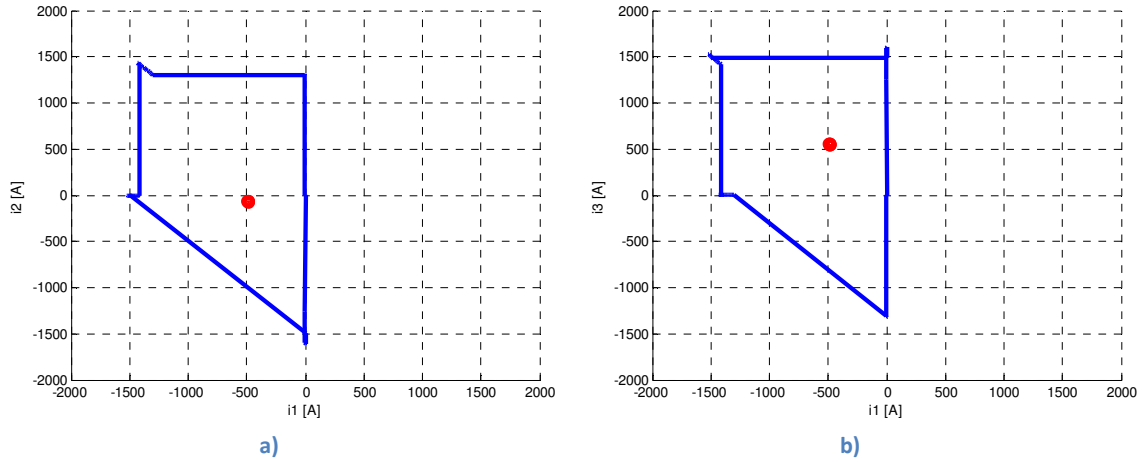


Figura 28: Representação bidimensional das correntes de alimentação (durante a falha)

Se o defeito for no tiristor 2, o centro de massa desloca-se para a parte positiva do eixo da corrente  $i_1$ .

O modo como o centro de massa se desloca, respeita um comportamento padrão consoante o defeito a que está sujeito. Após a obtenção deste padrão é possível identificar qual o tiristor do retificador que está em defeito.

O cálculo do centro de massa do círculo é obtido utilizando a expressão (3), em que o  $N$  é o número de amostras para um ciclo.

$$\begin{cases} dcm\_1 = \frac{\sum_{n=1}^N i_{1n}}{N} \\ dcm\_2 = \frac{\sum_{n=1}^N i_{2n}}{N} \\ dcm\_3 = \frac{\sum_{n=1}^N i_{3n}}{N} \end{cases} \quad (3)$$

No sentido de se desenvolver um algoritmo para a identificação das falhas, será utilizado o valor da distância entre a linha do hexágono e o centro de massa. Este valor será determinado através da expressão (4), sendo  $k$  a amostra das correntes num dado instante.

$$rc = \sqrt{(dcm_1 - i_{1k})^2 + (dcm_2 - i_{2k})^2 + (dcm_3 - i_{3k})^2} \quad (4)$$

Contudo, conforme é possível verificar pela Figura 25, dado que a imagem é hexagonal, o raio não será constante ao longo do tempo. Deste modo, será utilizado um raio de uma circunferência equivalente (Figura 29), sendo este determinado pela seguinte expressão:

$$rc_{av} = \frac{\sum_{n=1}^N \sqrt{(dcm_1 - i_{1k})^2 + (dcm_2 - i_{2k})^2 + (dcm_3 - i_{3k})^2}}{N} \quad (5)$$

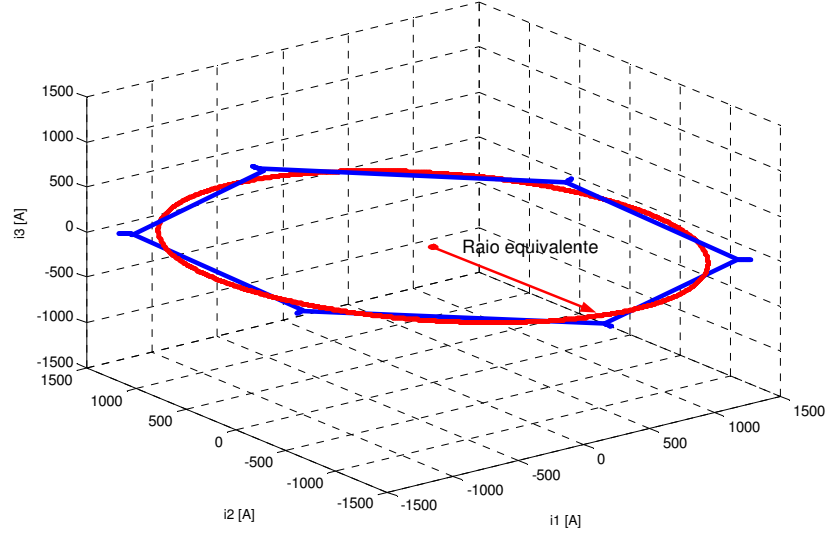


Figura 29: Centro de massa e raio equivalente na representação 3D

No sentido de se utilizar valores independentes da carga, será utilizado um índice designado de variável de diagnóstico normalizada (VDN) (expressão (6)), sendo determinada pela relação entre as coordenadas do centro de massa e o raio equivalente.

$$VDN_i = \frac{dcm_i}{rc_{av}}, i \in \{1,2,3\} \quad (6)$$

Dado que em situação normal o centro de massa se encontra na origem, os VDN têm valores de aproximadamente zero. Contudo, em situação de falha do conversor, estes assumem valores negativos ou positivos. A

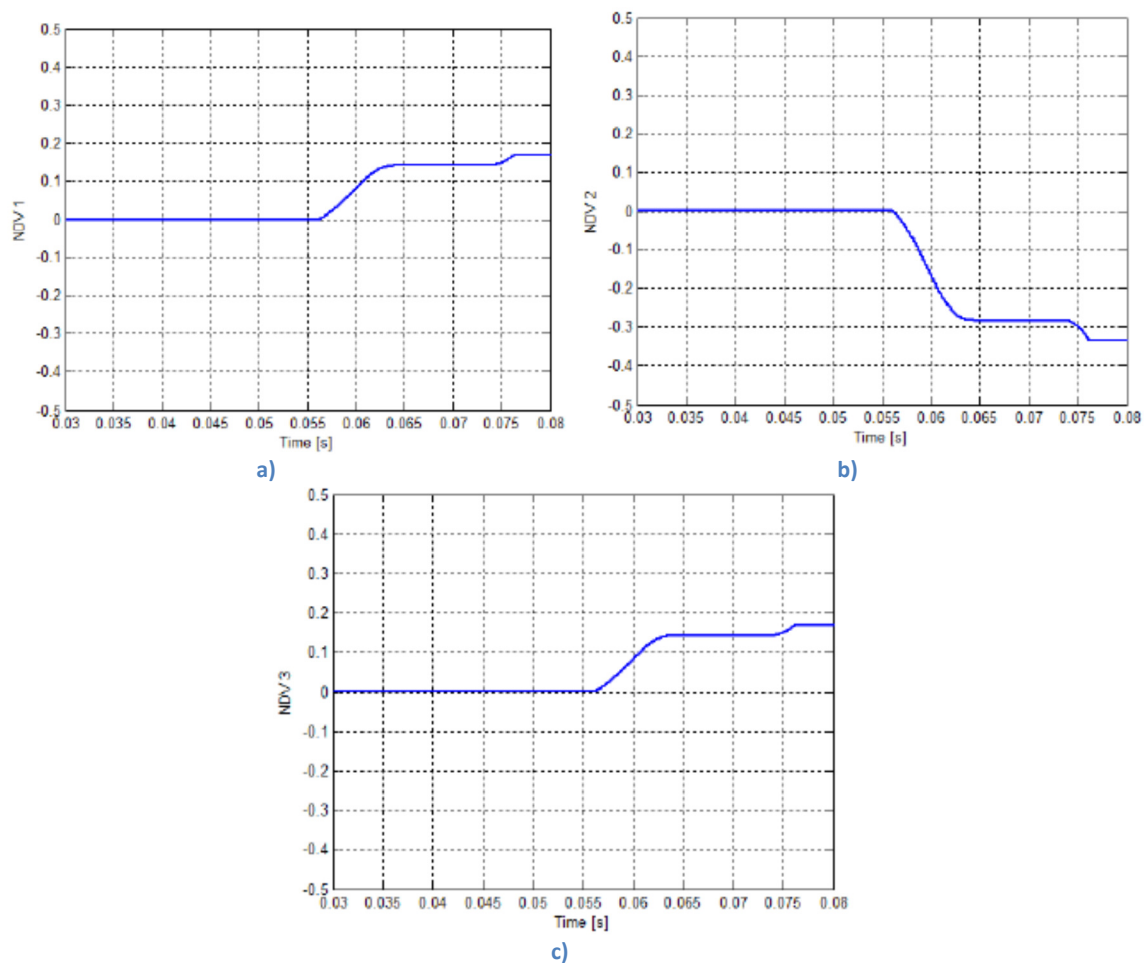
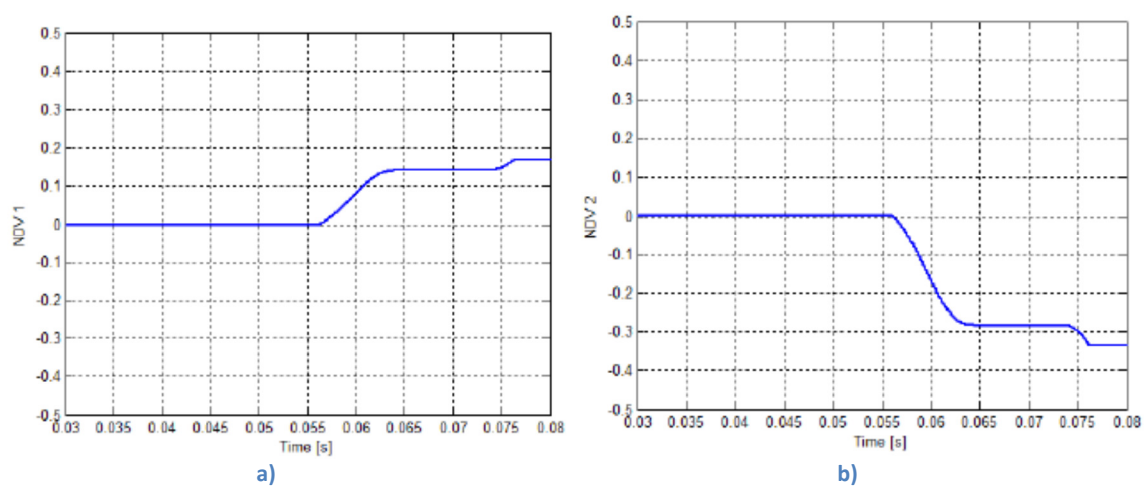
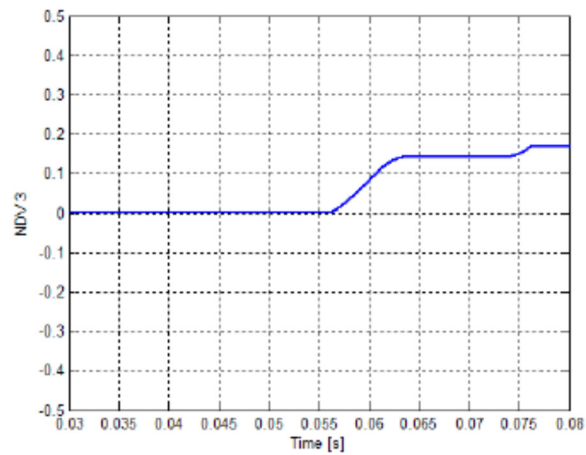


Figura 30 apresenta este comportamento. No instante 0,055s o retificador entra em defeito (falha de circuito aberto para o tiristor T5), pelo que a partir desse instante os VDN 1 e 3 irão assumir valores positivos enquanto o VDN 2 passará a valores negativos.





c)

Figura 30: Comportamento das variáveis de diagnóstico normalizada para a situação de falha.

De modo a identificar o semicondutor que se encontra em situação de falha, será utilizado um comparador de três níveis. Assim, para cada VDN será utilizado o comparador de três níveis apresentado na Figura 31, que em caso de falha, torna possível identificar se o semicondutor em situação de falha é o superior ou inferior (1 ou -1). Deste modo, através da conjugação das saídas dos três comparadores, será possível identificar a falha de qualquer dos semicondutores da ponte, conforme é possível verificar pela Tabela 1.

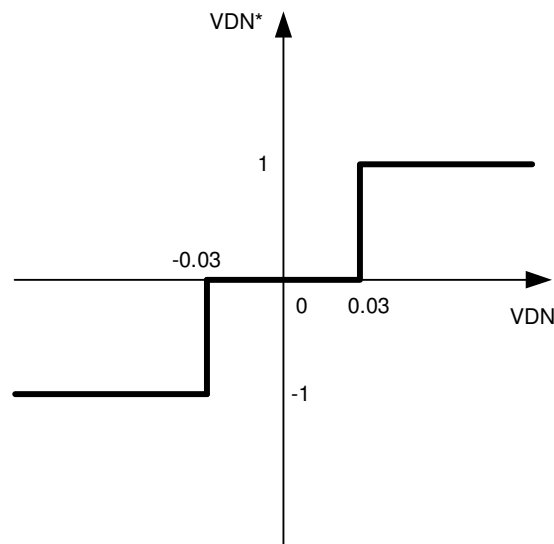


Figura 31: Histerese utilizada na identificação de falha em cada semicondutor

**Tabela 1: Relação entre os semicondutores em defeito e os sinais dos VDN\***

	VDN*1	VDN*2	VDN*3
T1	-1	-1	+1
T2	+1	-1	+1
T3	+1	-1	-1
T4	+1	+1	-1
T5	-1	+1	-1
T6	-1	+1	+1
NORMAL	0	0	0

Como se pode observar na Tabela 1, existem padrões distintos para defeitos em cada tiristor, permitindo desta forma, através da interpretação dos sinais de VDN\*, identificar os tiristores em falha. Para o caso de não existir qualquer anomalia no retificador, o valor dos VDN 1, 2 e 3 será zero.

## 5.3. Análise das falhas no circuito de excitação

---

Para comprovar este método foram efetuados vários ensaios de simulação, utilizando o programa *Matlab/Simulink*. Foram criados cenários de simulação, em que numa primeira fase o controlador está fora de serviço, sendo o ângulo de disparo  $\alpha$  constante. Também foi alterado o valor da resistência do rotor de modo a obter diferentes valores de correntes.

Numa segunda fase, estes cenários de simulação foram todos repetidos mas com o controlador em funcionamento, atuando diretamente no ângulo de disparo  $\alpha$  de modo a manter constante a tensão contínua à saída do retificador.

### 5.3.1. Sem controlo de tensão ( $R=0,1\Omega$ )

---

Para esta simulação foi atribuído um valor de  $\alpha=108^\circ$  e o valor da resistência do enrolamento do rotor de  $0,1\Omega$ .

Na Tabela 2 apresentam-se os valores de VDN obtidos para esta situação.



**Tabela 2: Valores de VDN ( $R=0,1\Omega$  sem AVR)**

	VDN1	VDN2	VDN3
T1	-0,2951	-0,1644	0,4595
T2	0,1653	-0,4595	0,2942
T3	0,4602	-0,2952	-0,1651
T4	0,2951	0,1644	-0,4595
T5	-0,1653	0,4595	-0,2942
T6	-0,4602	0,2952	0,1651
Normal	-1,21E-08	9,45E-08	-8,24E-08

Através dos resultados apresentados na Tabela 2, é possível observar que para uma situação normal, sem qualquer defeito no retificador, os valores de VDN estão muito próximos de zero. Contudo, tal como expectável, estes valores deixam de ser aproximadamente zero em situação de falha de semiconductor. Na Tabela 3, apresenta-se os valores obtidos na saída dos comparadores de três níveis, para a situação normal e para a falha de cada um dos semicondutores. Conforme é possível verificar através desta tabela, para cada uma das situações existe um padrão distinto que permite identificar o semiconductor em falha.

**Tabela 3: Valores de VDN\* ( $R=0,1\Omega$  sem AVR)**

	VDN*1	VDN*2	VDN*3
T1	-1	-1	1
T2	1	-1	1
T3	1	-1	-1
T4	1	1	-1
T5	-1	1	-1
T6	-1	1	1
Normal	0	0	0

No sentido de se analisar a metodologia proposta são apresentadas diversas situações de falhas em tirístores (circuito aberto). Nas figuras 32, 33 e 34 são apresentados os resultados obtidos para uma situação de falha para o tiristor 1. É possível verificar através da Figura 32 que as correntes de entrada do retificador deixam de ser simétricas. O mesmo sucede com os padrões obtidos para as correntes no sistema tridimensional (Figura 33), ou seja, deixa de existir um hexágono simétrico. Também é possível verificar este comportamento através do sistema bidimensional onde se apresenta a corrente  $i_2$  em função de  $i_1$  e  $i_3$  em função de  $i_1$  (Figura 33).

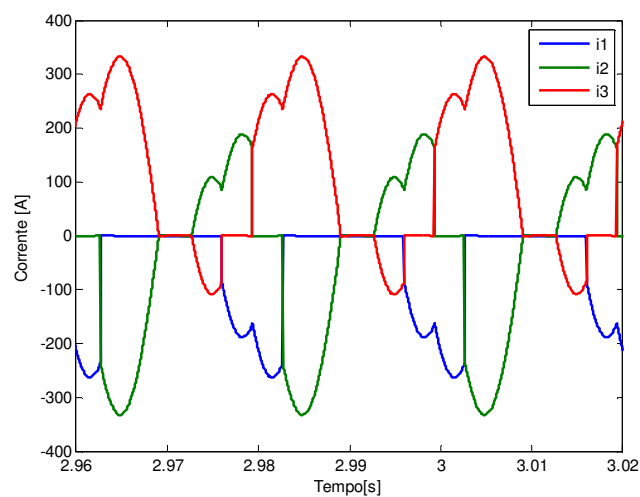
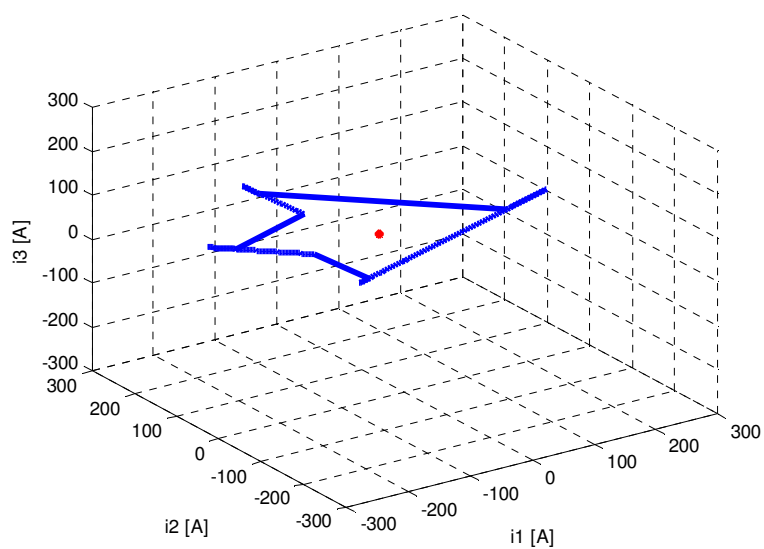
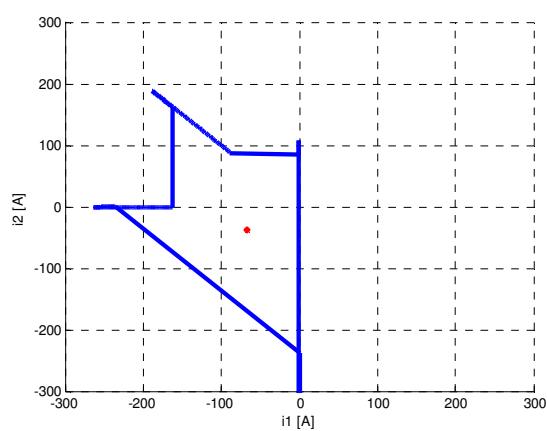


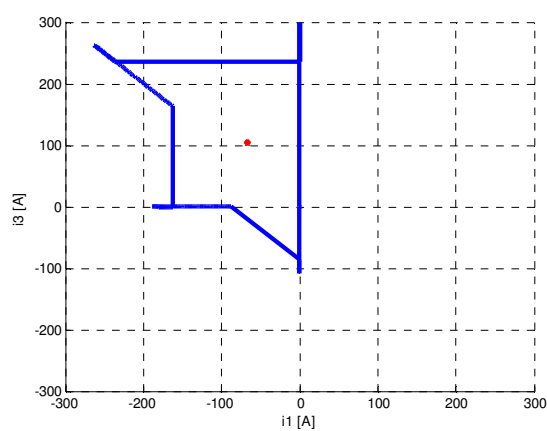
Figura 32: Forma das ondas quando T1 está em defeito ( $R=0,1\Omega$  sem AVR)



a)



b)



c)

Figura 33: Deslocação do centro de massa quando T1 está em defeito ( $R=0,1\Omega$  sem AVR)

Como se pode observar pela Figura 34, o retificador, numa fase inicial, encontra-se numa situação normal, isto é, sem qualquer defeito, passando a partir do instante 2 segundos a situação de falha do tiristor T1. A Figura 34 indica o comportamento das variáveis de diagnóstico normalizadas ao longo do tempo. Através desta figura é possível verificar que a partir do instante 2 segundos, onde se deu a falha do tiristor, estas variáveis deixaram de apresentar o valor de zero. Através desta figura também é possível verificar que as variáveis VDN 1 e VDN 2 passaram a negativo e a variável VDN 3 a positivo, indicando falha do tiristor T1 (conforme tinha sido apresentado através da Tabela 2)

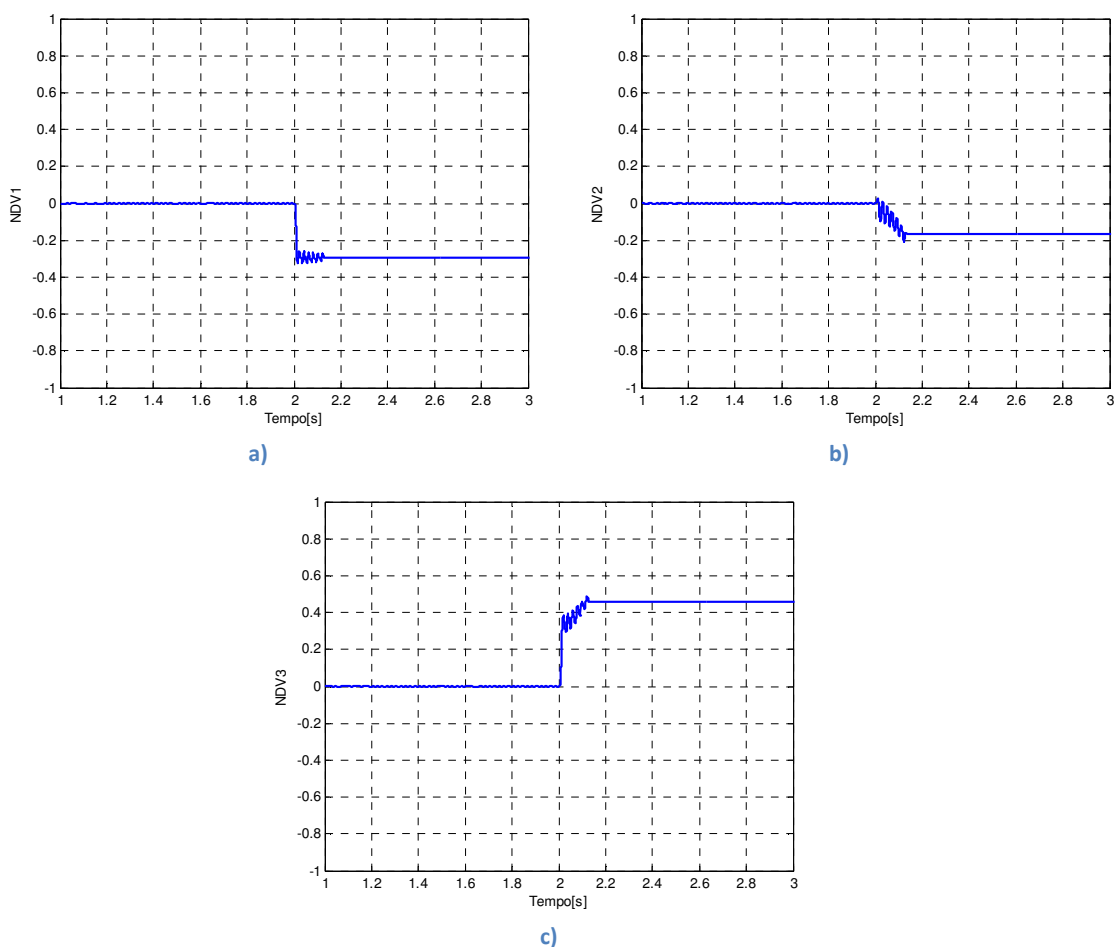


Figura 34: Variação de VDN durante a falha de T1 ( $R=0,1\Omega$  sem AVR)

Nesta situação, como se pode verificar através da Figura 34, o valor de VDN1 é de -0,29509, VDN2 é -0,16439 e VDN3 é 0,459476. Aplicando o comparador de 3 estados (Figura 31) é obtido o padrão -1 -1 1 para a falha de circuito aberto do T1, tal como indicado na Tabela 3.

Comparando a Figura 24 com a Figura 32, é possível observar que o valor de pico das correntes decresceu bastante. Isto deve-se ao controlador estar fora de serviço, pelo que não existe qualquer correção do  $\alpha$  de modo a colocar a tensão com os valores idênticos aos existentes antes da falha.

O caso da falha de circuito aberto no T6 é indicado nas figuras 35, 36 e 37. Através da análise da Figura 35 verifica-se, tal como no caso anterior, que as correntes de alimentação não são simétricas, não apresentando a corrente  $i_2$  qualquer valor no ciclo negativo. Este comportamento das correntes reflete-se na sua representação tridimensional, deformando o hexágono e formando o padrão que permite a identificação da avaria no T6 (Figura 36). Durante a permanência da avaria, o centro de massa do hexágono desloca-se para valores negativos de  $i_1$  e positivos de  $i_2$  e  $i_3$ . Esta deslocação também pode ser visualizada pelos gráficos bidimensionais onde se representa a corrente  $i_2$  em função de  $i_1$  e  $i_3$  em função de  $i_1$ .

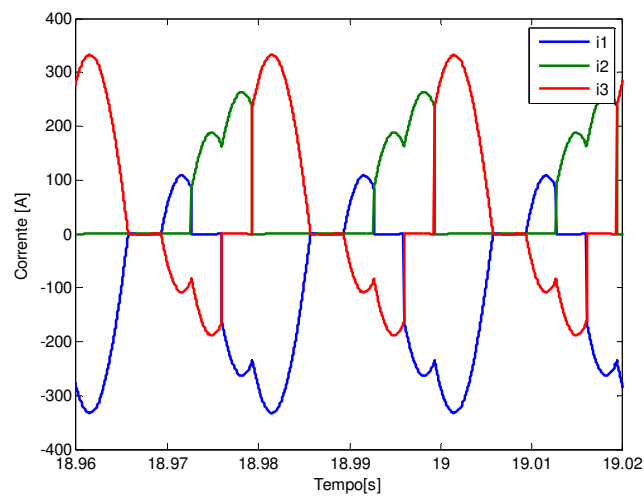
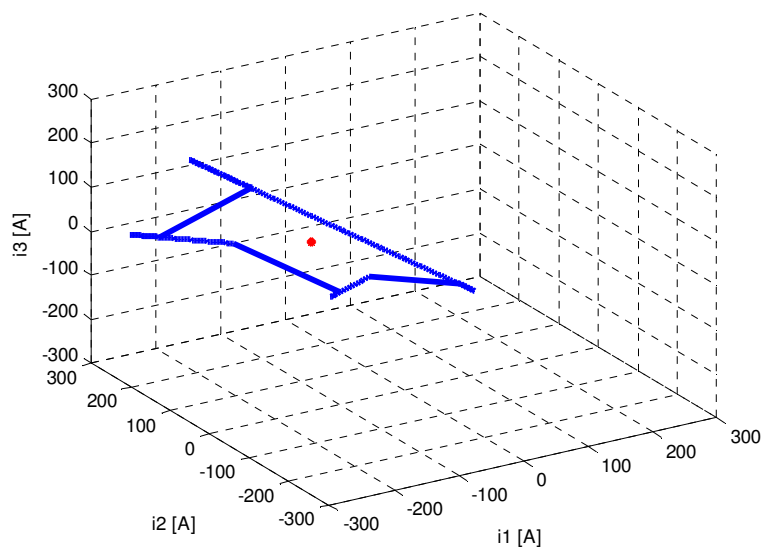


Figura 35: Forma das ondas quando T6 está em defeito ( $R=0,1\Omega$  sem AVR)



a)

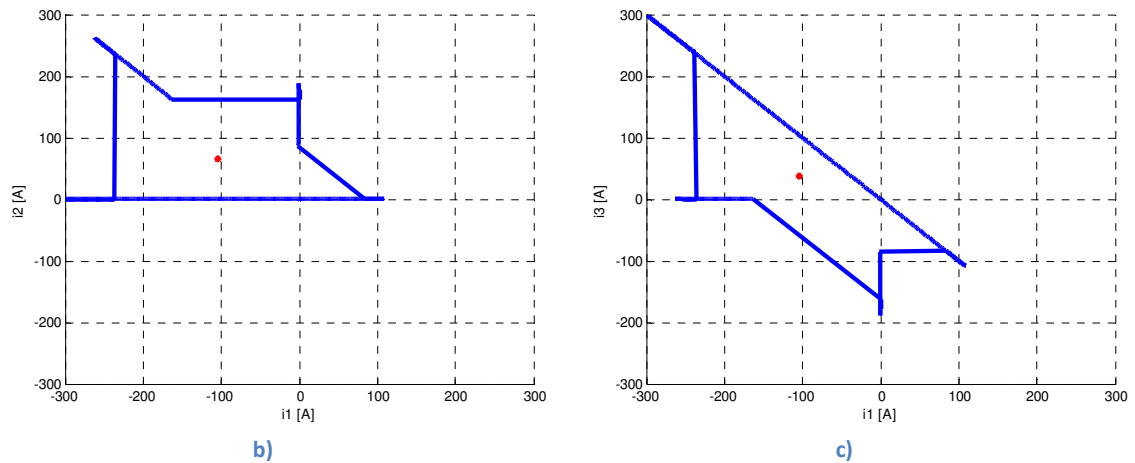


Figura 36: Deslocação do centro de massa quando T6 está em defeito ( $R=0,1\Omega$  sem AVR)

Este ensaio teve como situação inicial o retificador a funcionar normalmente, sendo o defeito aplicado ao T6 no instante 18 segundos. O comportamento ao longo do tempo das variáveis de diagnóstico normalizadas é indicado na Figura 37. É possível identificar através destes gráficos que o defeito apareceu no instante 18 segundos, deixando as VDN de ter o valor zero e assumindo os valores de -0,46024 para VDN1, 0,295178 para VDN 2 e 0,165058 para VDN 3, tal como indicado na Tabela 2.

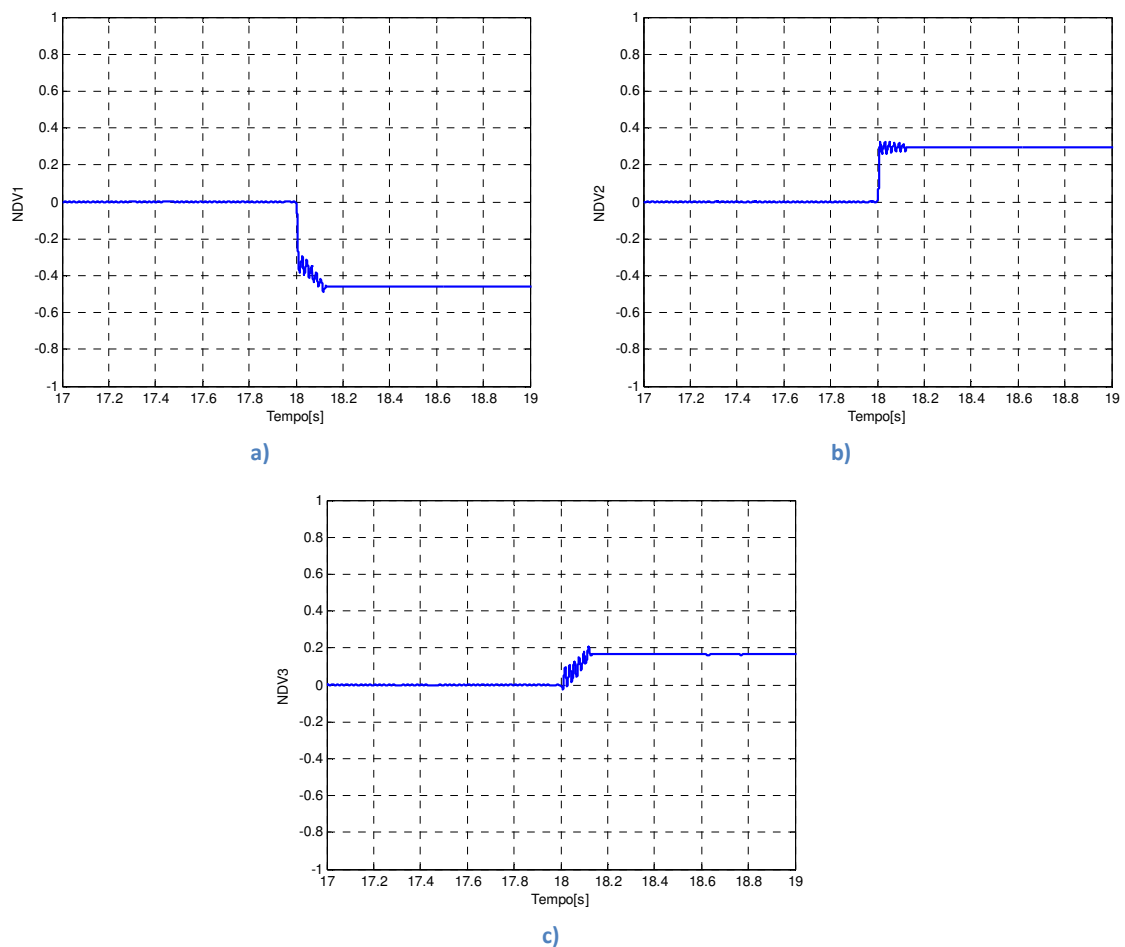


Figura 37: Variação de VDN durante a falha de T6 ( $R=0,1\Omega$  sem AVR)

Aplicando os valores assumidos pelas VDN ao comparador de 3 estados, foi obtida a saída  $VDN^*1=-1$ ,  $VDN^*2=+1$  e  $VDN^*3=+1$  (Tabela 3). Conjugando estes três valores é agora possível identificar que o defeito está no tiristor 6.

A última situação apresentada, para o ensaio simulado sem controle de tensão, é o defeito de circuito aberto no tiristor 5. Os resultados deste ensaio são apresentados nas figuras 38, 39 e 40. Analisando a Figura 38 observa-se que existe uma assimetria nas correntes de alimentação do retificador e a corrente  $i_3$  não tem valores para o ciclo positivo. Isto porque T5 está localizado na parte superior do braço do retificador. Esta situação é idêntica à verificada no defeito em T1, pois T1 também se encontra na parte superior do seu braço.

Esta assimetria verificada nas correntes de alimentação traduz-se na deformação do hexágono representado no espaço tridimensional (Figura 38), com a consequente deslocamento do seu centro, que também pode ser observada na representação bidimensional da corrente  $i_2$  em função de  $i_1$  e  $i_3$  em função de  $i_1$ .

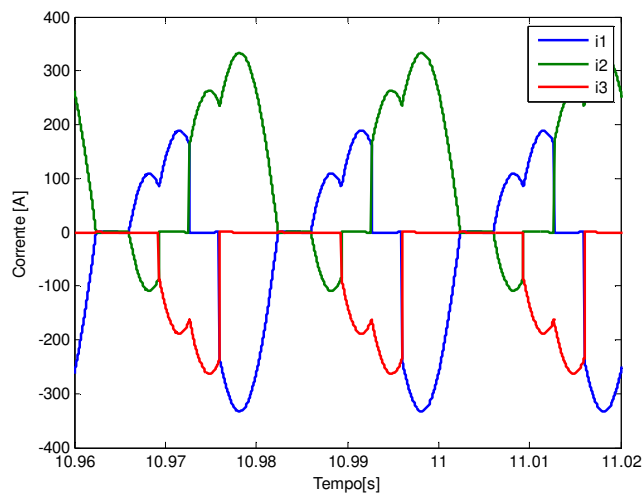


Figura 38: Forma das ondas quando T5 está em defeito ( $R=0,1\Omega$  sem AVR)

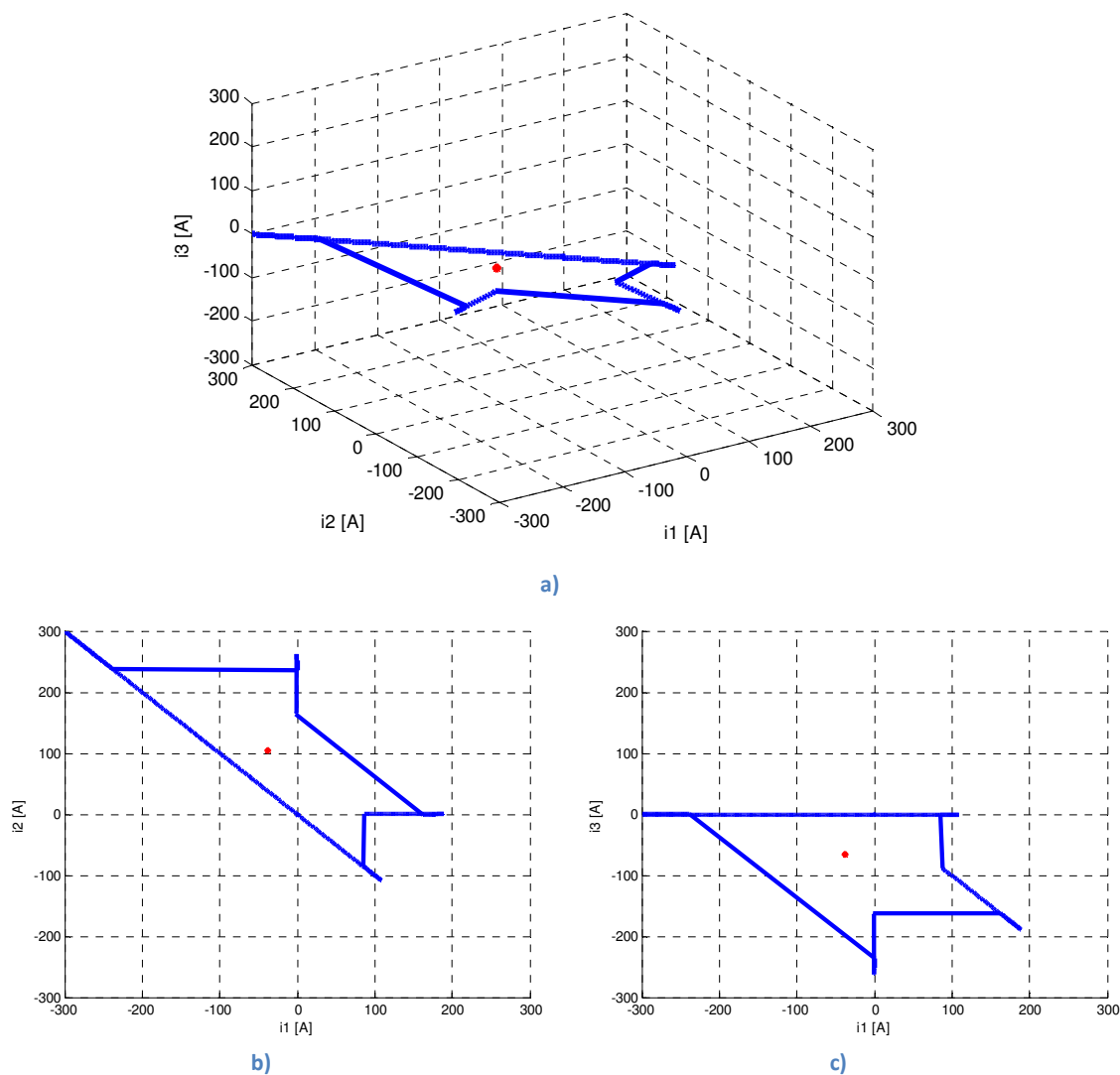


Figura 39: Deslocação do centro de massa quando T5 está em defeito ( $R=0,1\Omega$  sem AVR)

O centro de massa, durante a presença do defeito em  $t_5$ , encontra-se na parte negativa do eixo da corrente  $i_1$  e  $i_3$  e na parte positiva do eixo da corrente  $i_2$ .

Este ensaio partiu da situação inicial de ausência de defeito no retificador, tendo as Variáveis de Diagnóstico Normalizadas o valor zero, antes do defeito, como podemos ver pela Figura 40. O defeito de circuito aberto é provocado no instante 10 segundos, passando as VDN 1 e VDN 3 para valores negativos e VDN 2 para valores positivos. Estes valores estão apresentados na Tabela 2 para a situação de defeito em T5.

A aplicação dos valores VDN no comparador de três estados identifica o T5 como sendo o semiconductor em defeito, sendo o padrão obtido de  $VDN^*1=-1$ ,  $VDN^*2=1$  e  $VDN^*3=-1$ , como indicado na Tabela 3.

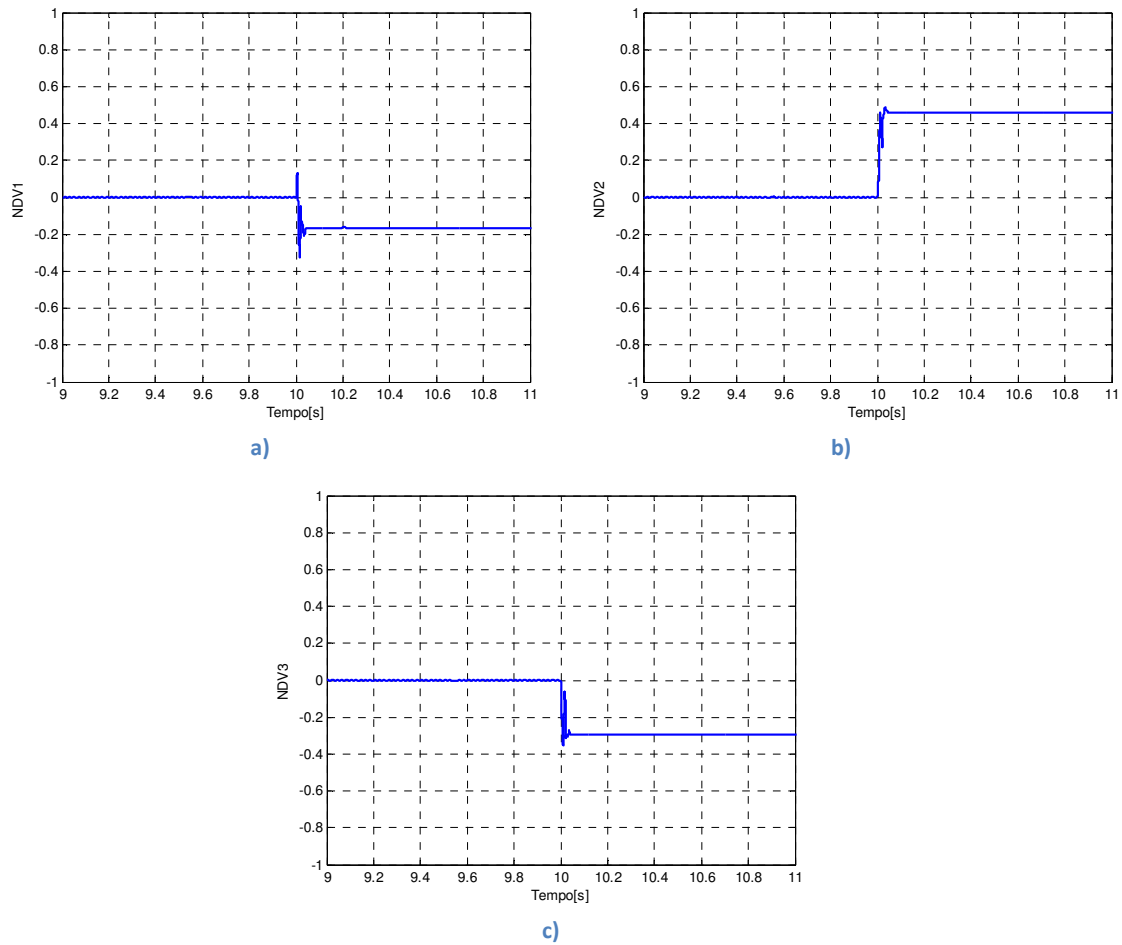


Figura 40: Variação de VDN durante a falha de T5 ( $R=0,1\Omega$  sem AVR)

### 5.3.2. Simulação sem controlo de tensão ( $R=0,3\Omega$ )

Nesta simulação o controlo de tensão à saída do retificador permanece desligado, sendo mantido o ângulo de disparo  $\alpha=108^\circ$ . Foi alterado o valor da resistência à saída do retificador, de  $0,1\Omega$  para  $0,3\Omega$ , de modo a diminuir a corrente. O objetivo é verificar que, independentemente da corrente, os resultados são iguais para os mesmos defeitos.

Para esta situação os valores de VDN obtidos estão indicados na tabela abaixo e, comparando com a Tabela 2 é possível verificar que, apesar de idênticos, os valores são diferentes para uma corrente contínua inferior à saída do retificador.



**Tabela 4: Valores de VDN ( $R=0,3\Omega$  sem AVR)**

	VDN1	VDN2	VDN3
T1	-0,2985	-0,1529	0,4514
T2	0,1538	-0,4514	0,2976
T3	0,4522	-0,2986	-0,1536
T4	0,2985	0,1529	-0,4514
T5	-0,1538	0,4514	-0,2976
T6	-0,4522	0,2986	0,1536
Normal	-2,31E-09	2,16E-08	-1,93E-08

Aplicando o comparador de três estados aos valores acima indicados, foram obtidos os valores VDN\* indicados na Tabela 5. Através da formação de padrões com os valores VDN\* é possível identificar os defeitos nos 6 tirístores.

Comparando a Tabela 3 com a Tabela 5, verifica-se que os resultados são exatamente iguais, isto é, apesar de valores VDN diferentes, foram obtidos os mesmos valores para VDN\*. Para as mesmas condições verificadas nos ensaios anteriores, à exceção da corrente contínua que é menor neste caso devido ao aumento do valor da resistência no barramento CC, foram obtidos os mesmos resultados, o que permite confirmar que a utilização deste método para identificação de semicondutores em defeito é independente dos valores das correntes fornecidas pelo retificador.

**Tabela 5: Valores de VDN\* ( $R=0,3\Omega$  sem AVR)**

	VDN*1	VDN*2	VDN*3
T1	-1	-1	1
T2	1	-1	1
T3	1	-1	-1
T4	1	1	-1
T5	-1	1	-1
T6	-1	1	1
Normal	0	0	0

### 5.3.3. Simulação com controlo de tensão ( $R=0,1\Omega$ )

---

Nas simulações seguintes foi colocado em funcionamento o controlador automático de tensão de saída do retificador. O ângulo de disparo  $\alpha$  deixou de ser definido manualmente, passando a ser definido pelo controlador de tensão. O valor da resistência no barramento CC foi novamente colocada com o valor de  $0,1\Omega$ , aumentando assim o valor da corrente contínua.

Para esta simulação foram obtidos os resultados indicados na Tabela 6:

**Tabela 6: Valores de VDN ( $R=0,1\Omega$  com AVR)**

	VDN1	VDN2	VDN3
T1	-0,2931	-0,0358	0,3289
T2	0,0381	-0,3290	0,2909
T3	0,3310	-0,2892	-0,0418
T4	0,2911	0,0410	-0,3321
T5	-0,0399	0,3314	-0,2915
T6	-0,3319	0,2923	0,0396
Normal	-2,70E-03	6,67E-03	-3,97E-03

É possível observar novamente que para a situação de ausência de defeito nos tirístores os VDN têm valores muito próximos de zero, mas para situações de anomalias nos semicondutores, os VDN assumem valores negativos ou positivos dependendo do tiristor que se encontre em defeito.

Como os valores de VDN obtidos neste ensaio e aplicando-os no comparador de três estados, são obtidos os resultados indicados na Tabela 7.

**Tabela 7: Valores de VDN\* ( $R=0,1\Omega$  com AVR)**

	VDN*1	VDN*2	VDN*3
T1	-1	-1	1
T2	1	-1	1
T3	1	-1	-1
T4	1	1	-1
T5	-1	1	-1
T6	-1	1	1
Normal	0	0	0

Nas próximas figuras 41, 42 e 43 são apresentados os resultados do ensaio com defeito no T1, e com o controlador da tensão de saída do retificador em funcionamento. Na Figura 41 é possível verificar a assimetria típica nas correntes de alimentação para a situação de defeito de circuito aberto. Neste caso, sendo a avaria provocada na T1, verifica-se que a corrente  $i_1$  não tem valores no ciclo positivo.

Através da comparação as figuras 24 e 32, é possível verificar que existe uma diminuição acentuada do valor de pico das correntes, uma vez que o  $\alpha$  estava fixo com o valor de  $108^\circ$ , não existindo qualquer correção da tensão quando esta diminuía devido ao aparecimento de um defeito. Neste caso, com o controlador de tensão em funcionamento, observa-se que o valor de pico da Figura 41 é aproximadamente igual ao valor verificado na Figura 24, pois o controlador mantém a tensão de saída no valor desejado fazendo ajustes necessários no ângulo de disparo  $\alpha$ .

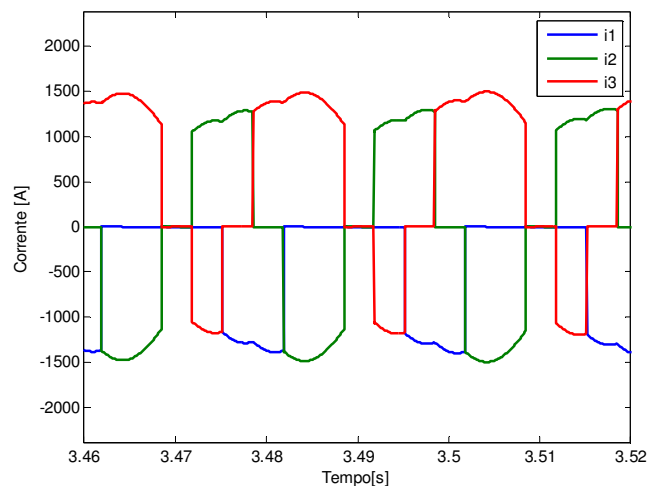
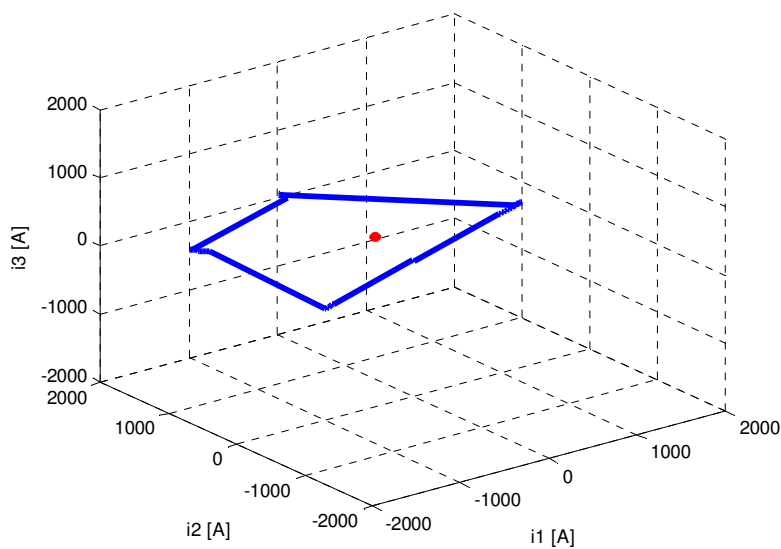


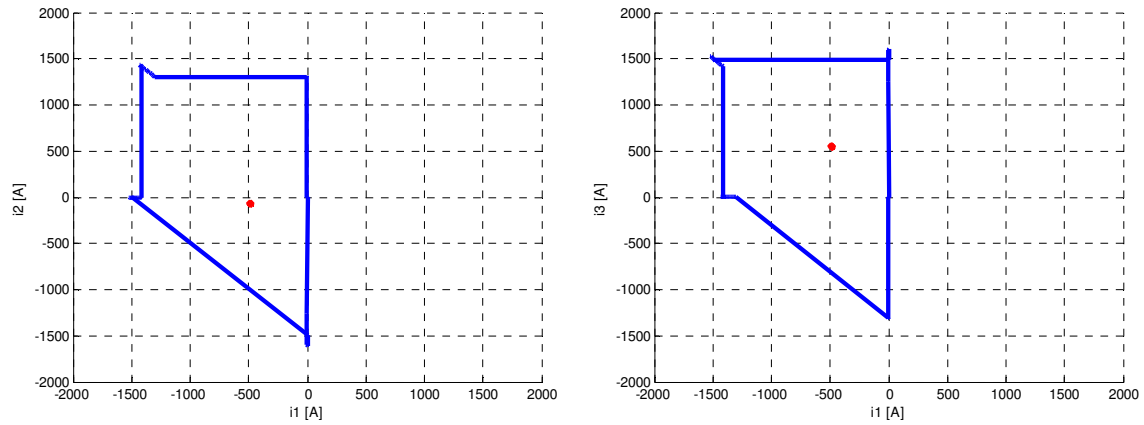
Figura 41: Forma das ondas quando T1 está em defeito ( $R=0,1\Omega$  com AVR)

Esta assimetria nas correntes de alimentação do retificador provoca a deformação do hexágono (Figura 42), ficando representado apenas metade do hexágono, sendo este o padrão tridimensional de defeito no T1. Consequentemente o seu centro de massa desloca-se para valores negativos do eixo das correntes  $i_1$  e  $i_2$  e valores positivos do eixo da corrente  $i_3$ . Isto também pode ser observado nas representações bidimensionais das correntes  $i_2$  e  $i_3$  em função de  $i_1$ .

Comparando a Figura 33, que representa do padrão tridimensional para o defeito em T1 sem controlo de tensão, com a Figura 41, é possível verificar que os padrões para o mesmo tipo de defeito são idênticos, independentemente de se utilizar controlador de tensão ou não.

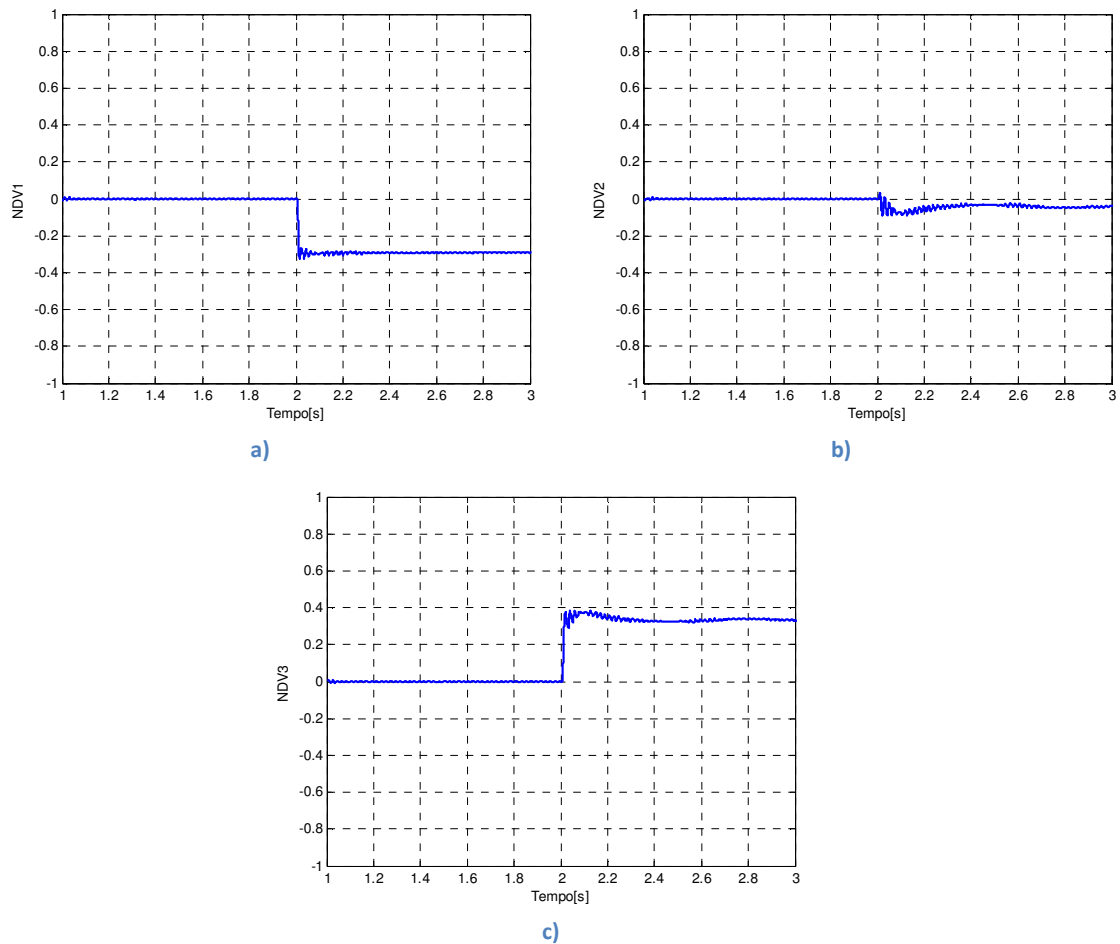


a)



b) c)  
 Figura 42: Deslocação do centro de massa quando T1 está em defeito ( $R=0,1\Omega$  com AVR)

Este ensaio, tal como os anteriores, parte de uma situação de ausência de qualquer defeito no retificador, ficando o T1 sujeito ao defeito de circuito aberto no instante 2 segundos. Este momento é visível na Figura 43 em que os VDN deixam de ter o valor zero assumindo VDN 1 e 2 valores negativos e VDN 3 valores positivos. Estes valores VDN estão apresentados na Tabela 6 para o defeito no T1.



a) b) c)  
 Figura 43: Variação de VDN durante a falha de T1 ( $R=0,1\Omega$  com AVR)

Os resultados de VDN\* obtidos com a aplicação do comparador de três estados aos VDN são o padrão VDN\*a=-1, VDN\*2=-1 e VDN\*3=1, como apresentado na Tabela 7.

Os resultados obtidos para o ensaio com defeito de circuito aberto no T6 estão apresentados nas figuras 44, 45 e 46. Neste caso, como o T6 está localizado no braço central inferior, a corrente  $i_2$  não tem valores negativos. O padrão para o defeito em T6, representado na Figura 45, apresenta metade do hexágono que é obtido quando há ausência de defeitos. Isto deve-se à assimetria das correntes de entrada do retificador. Dado que apenas é obtido metade do hexágono, o seu centro de massa, durante a presença do defeito, já não se encontra na origem dos três eixos das correntes, mas sim na parte negativa do eixo da corrente  $i_1$  e parte positiva das correntes  $i_2$  e  $i_3$ . Esta nova posição do centro de massa além de ser observada na representação tridimensional pode também ser vista na representação bidimensional das correntes  $i_2$  e  $i_3$  em função de  $i_1$ , tal como indicado na Figura 45.

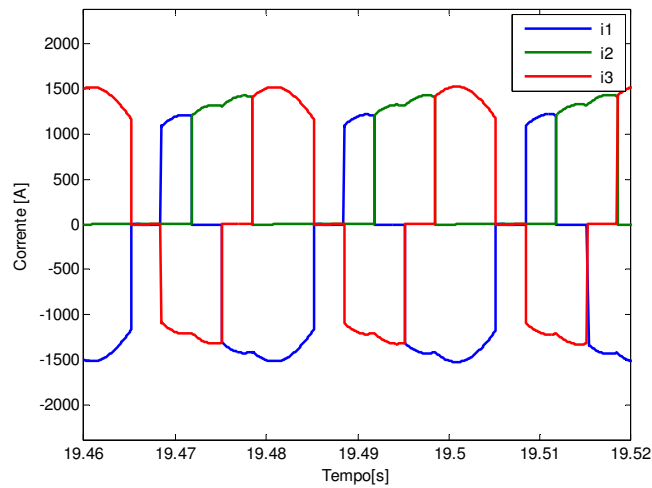


Figura 44: Forma das ondas quando T6 está em defeito ( $R=0,1\Omega$  com AVR)

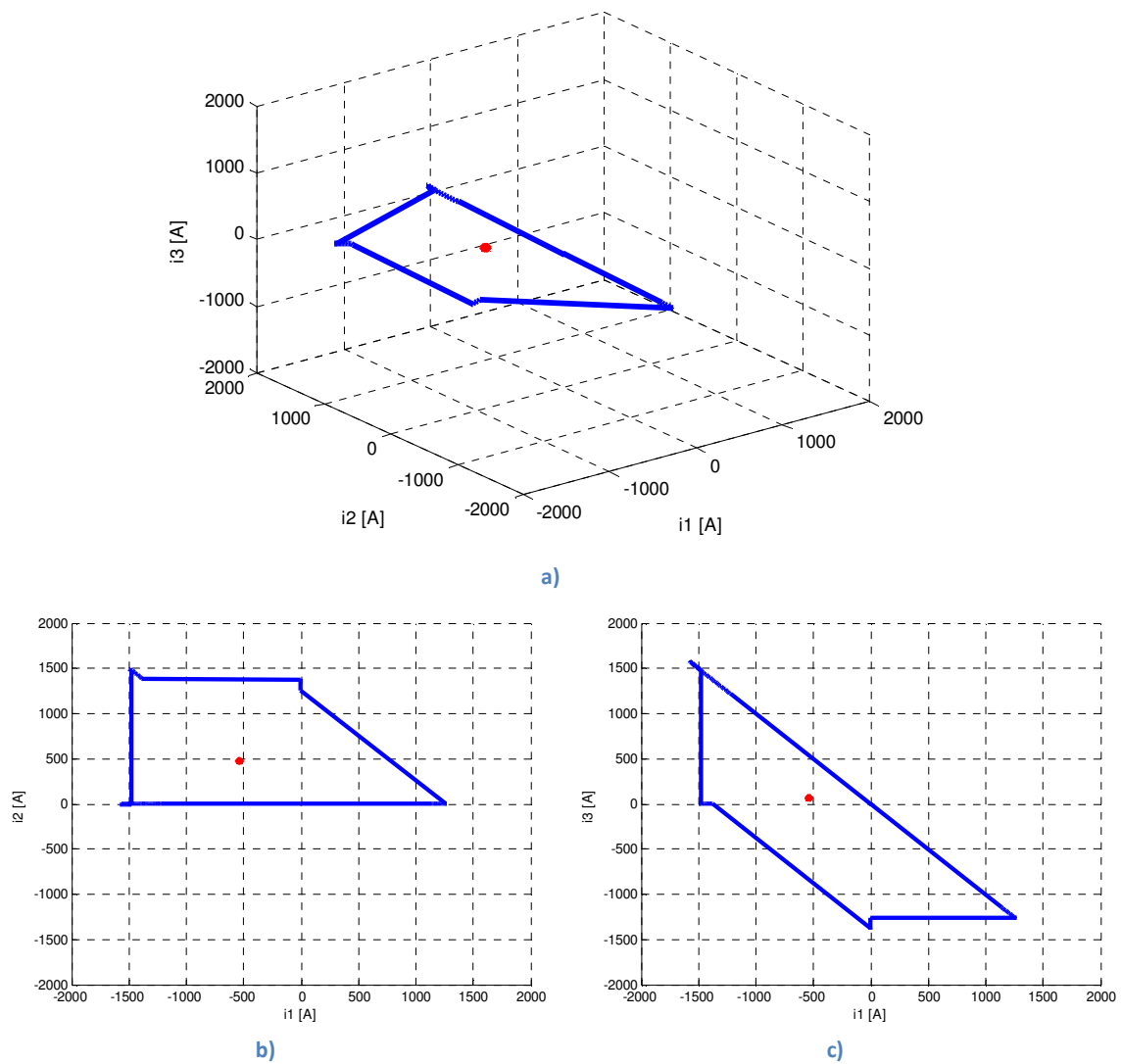


Figura 45: Deslocação do centro de massa quando T6 está em defeito ( $R=0,1\Omega$  com AVR)

O defeito no T6 é provocado quando o tempo é igual a 18 segundos. Analisando a Figura 46 é possível verificar que antes deste instante, quando o retificador funciona sem falhas, as Variáveis de Diagnóstico Normalizadas apresentam o valor zero e após o aparecimento da falha de circuito aberto em T6 estas passam a possuir valores positivos e negativos.

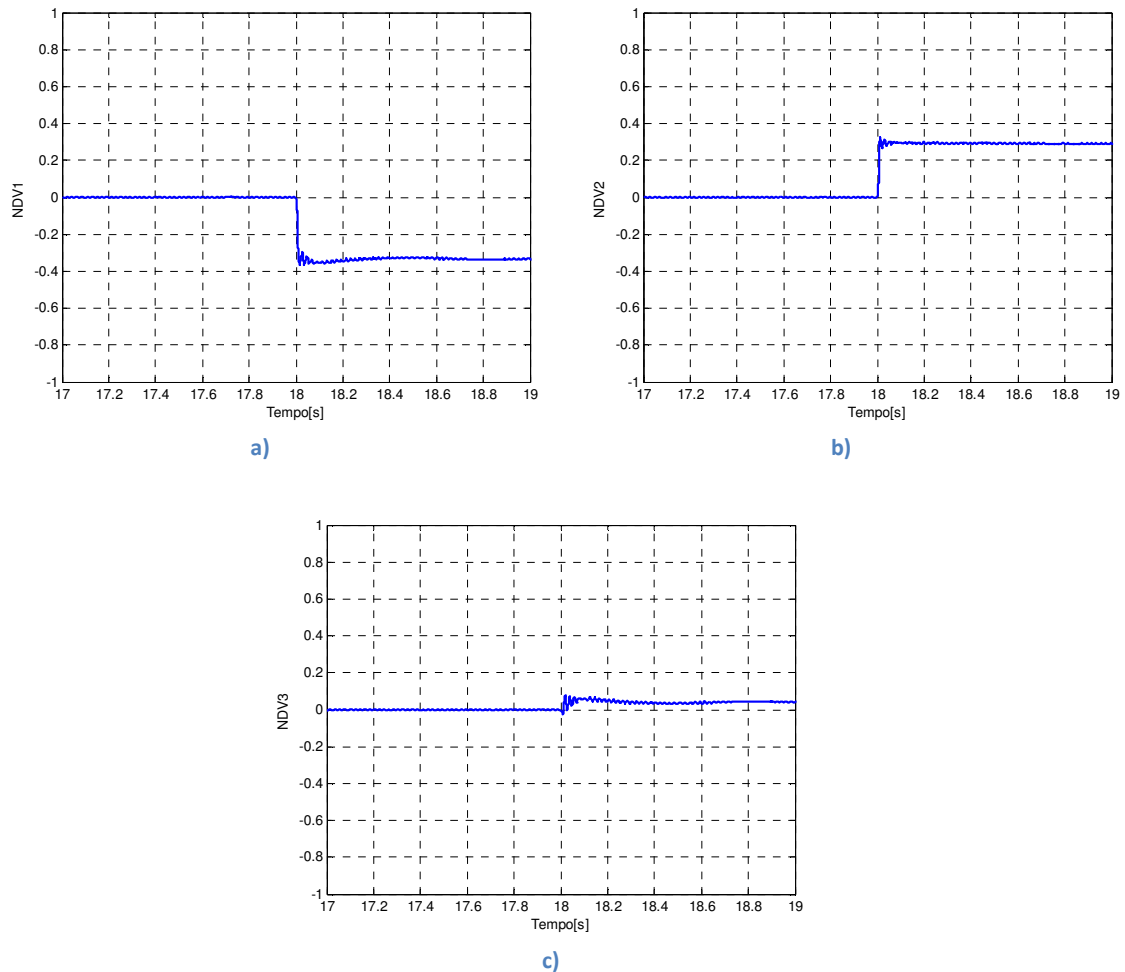


Figura 46: Variação de VDN durante a falha de T6 ( $R=0,1\Omega$  com AVR)

Através dos gráficos acima e da Tabela 6 verifica-se que VDN1 é negativo e VDN2 e 3 são positivos. Os resultados obtidos à saída do comparador de três níveis correspondem a  $VDN^*1=-1$ ,  $VDN^*2=1$  e  $VDN^*3=1$ , tal como indicado na Tabela 7.

Os resultados verificados durante o ensaio de defeito de circuito aberto no tiristor 5 estão indicados nas figuras 47, 48 e 49. A assimetria verificada nas correntes de alimentação durante o defeito em T5 está visível na Figura 47, onde é possível ver que a corrente de alimentação  $i_3$  não tem qualquer valor no ciclo positivo. Tal como nos casos anteriores a explicação prende-se com a localização do semiconductor em questão, o T5 está localizado na parte superior do terceiro braço e como está com defeito de circuito aberto, não permite que a corrente  $i_3$  circule no barramento CC durante o seu ciclo positivo.

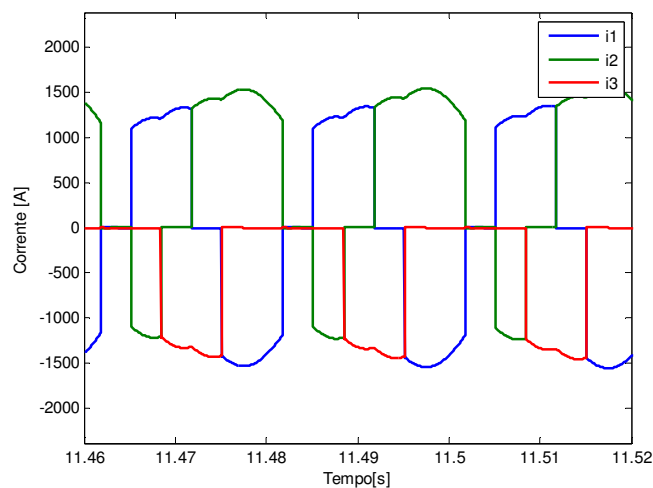


Figura 47: Forma das ondas quando T5 está em defeito ( $R=0,1\Omega$  com AVR)

O padrão tridimensional obtido para a falha no T5 está representado na Figura 48. O centro de massa da metade hexágono obtido durante a presença do defeito deslocou-se da origem dos três eixos das correntes para a parte negativa do eixo das correntes  $i_1$  e  $i_3$  e para a parte positiva do eixo da corrente  $i_2$ . Este deslocamento do centro de massa também é visível na representação bidimensional de  $i_2$  em função de  $i_1$  e  $i_3$  em função de  $i_1$ .



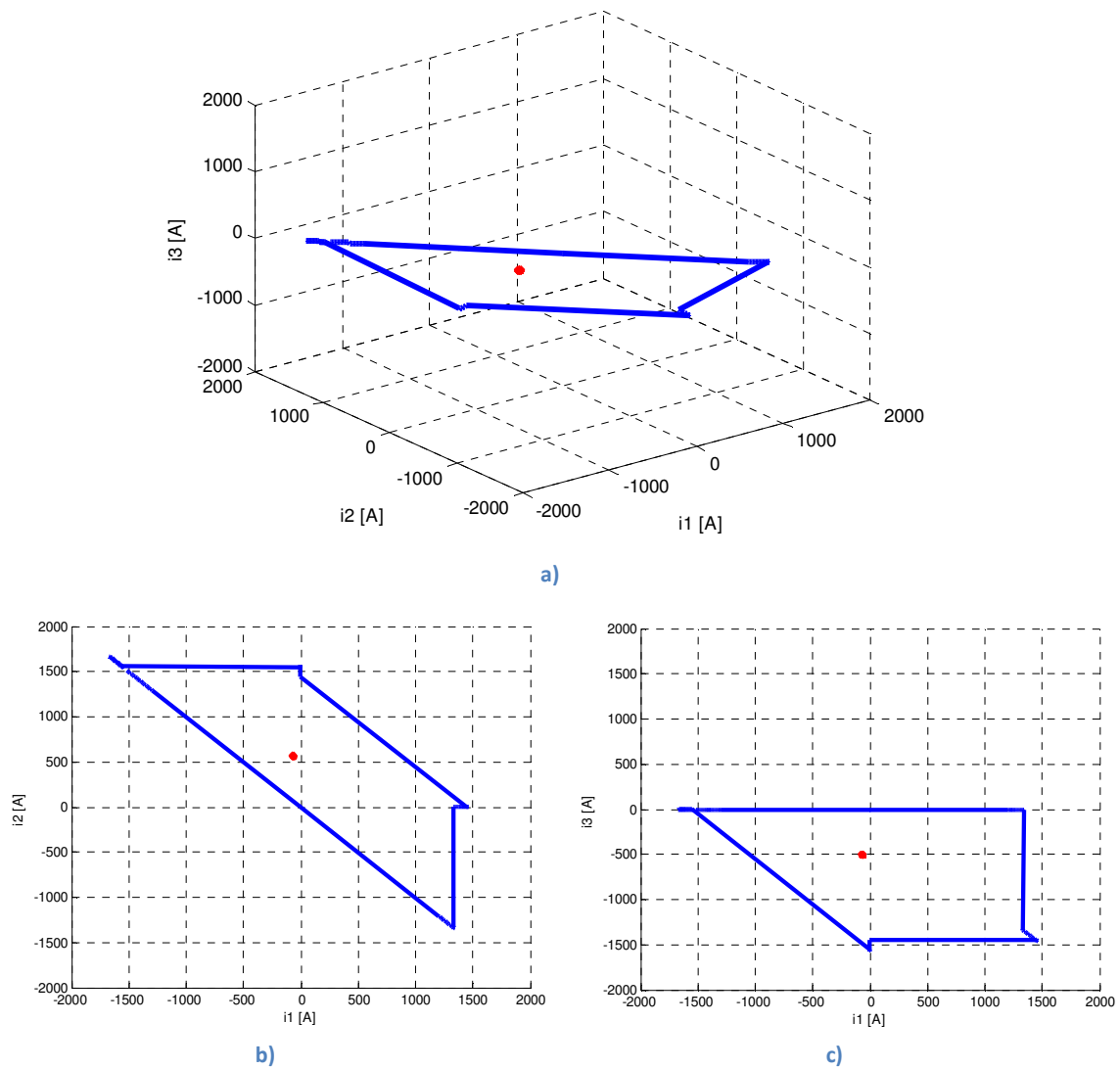


Figura 48: Deslocação do centro de massa quando T5 está em defeito ( $R=0,1\Omega$  com AVR)

O defeito em T5 é provocado no instante 10 segundos, assumindo VDN 1 e 3 valores negativos e VDN2 valores positivos (Figura 49). Antes deste momento os três parâmetros tinham o valor zero. Estes valores estão indicados na Tabela 6. Aplicando o comparador é alcançado o resultado que está indicado na Tabela 7, que é o padrão de defeito para o T5 que é  $VDN^*1=-1$ ,  $VDN^*2=1$  e  $VDN^*3=-1$ .

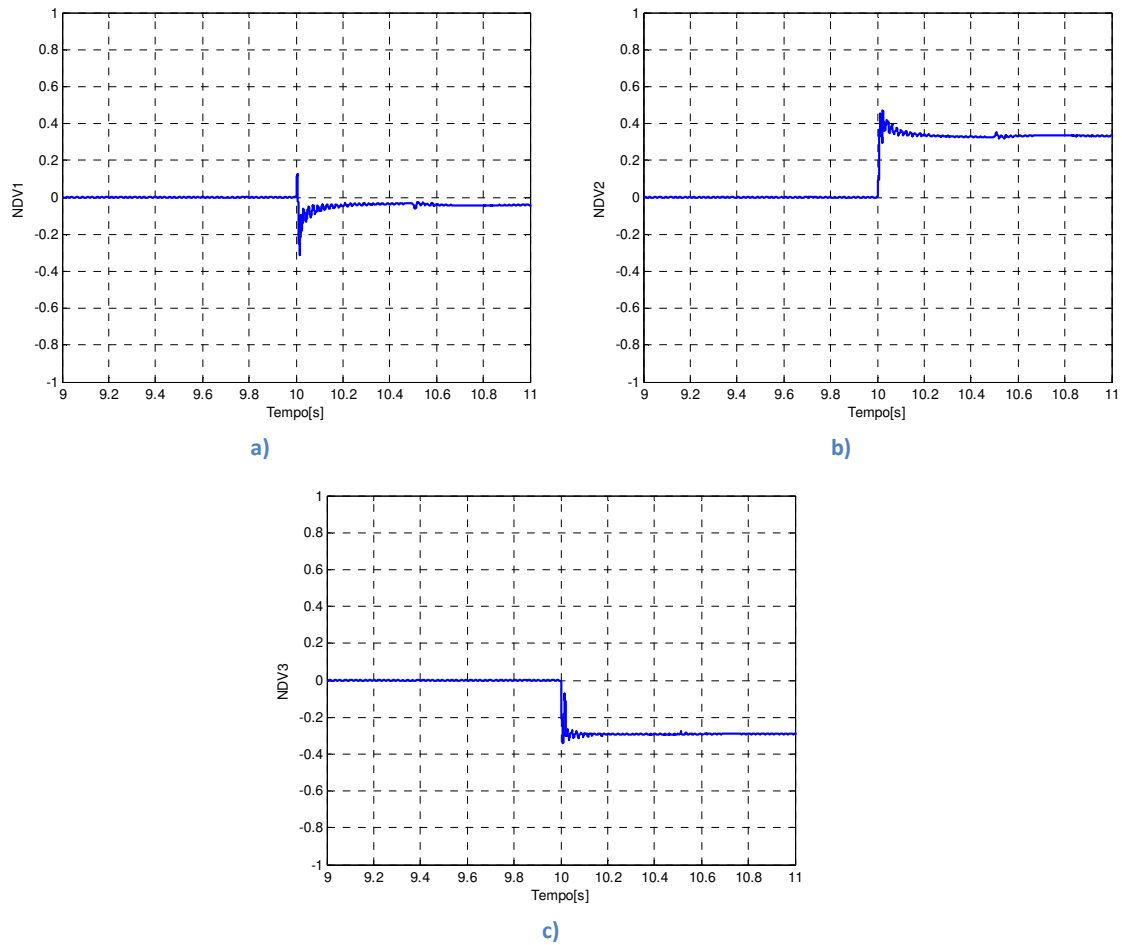


Figura 49: Variação de VDN durante a falha de T5 ( $R=0,1\Omega$  com AVR)

### 5.3.4. Simulação com controlo de tensão ( $R=0,3\Omega$ )

Com o objetivo de verificar que o método funciona para outros valores de correntes, foi alterado o valor da resistência do barramento CC de modo a diminuir a corrente contínua à saída do retificador. A resistência foi alterada do valor  $0,1\Omega$  para  $0,3\Omega$ . Tal como no caso anterior, o controlador automático de tensão continuou em serviço, controlando a tensão CC em torno dos 140V.

Para este ensaio foram alcançados os resultados disponíveis na Tabela 8, e comparando com as tabelas 2, 4 e 6, verifica-se que para os 4 ensaios realizados foram obtidos sempre valores de VDN diferentes, apesar de serem bastante próximos.

**Tabela 8: Valores de VDN ( $R=0,3\Omega$  com AVR)**

	VDN1	VDN2	VDN3
T1	-0,2982	-0,0863	0,3846
T2	0,0900	-0,3862	0,2963
T3	0,3884	-0,2945	-0,0939
T4	0,2959	0,0944	-0,3903
T5	-0,0934	0,3898	-0,2964
T6	-0,3888	0,2976	0,0912
Normal	-2,84E-03	9,29E-03	-6,45E-03

Aplicando o comparador de três níveis aos resultados da Tabela 8 foram obtidos os valores de VDN\* assinalados na Tabela 9. Comparando os resultados das tabelas 3, 5, 7 e 9, verifica-se, tal como queria demonstrar, que este método deteta e diagnostica exatamente o semiconductor em defeito independentemente do valor das correntes, dos ângulos de disparo ou modos de controlo.

**Tabela 9: Valores de VDN\* ( $R=0,3\Omega$  com AVR)**

	VDN*1	VDN*2	VDN*3
T1	-1	-1	1
T2	1	-1	1
T3	1	-1	-1
T4	1	1	-1
T5	-1	1	-1
T6	-1	1	1
Normal	0	0	0

### 5.3.5. Resposta do sistema para variações de tensão CC

No sentido de verificar se o método de deteção e diagnóstico proposto é imune às variações de referência de tensão, foram efetuadas simulações em cadeia fechada. Deste modo, foi efetuado um ensaio que consiste na alteração da referência durante períodos regulares. A Tabela 10 apresenta os instantes e os valores de tensão solicitados ao controlador.

**Tabela 10: Valores de referência para o controlador de tensão do retificador de excitação.**

Tempo [s]	Valor inicial [V]	Valor Final [V]
4	130	140
7	140	135
10	135	120
13	120	140

Na Figura 50 é apresentada a referência do controlador, assim como, a respectiva resposta do sistema. Conforme é possível verificar por esta figura, o sistema reage de modo a estabilizar no valor de referência.

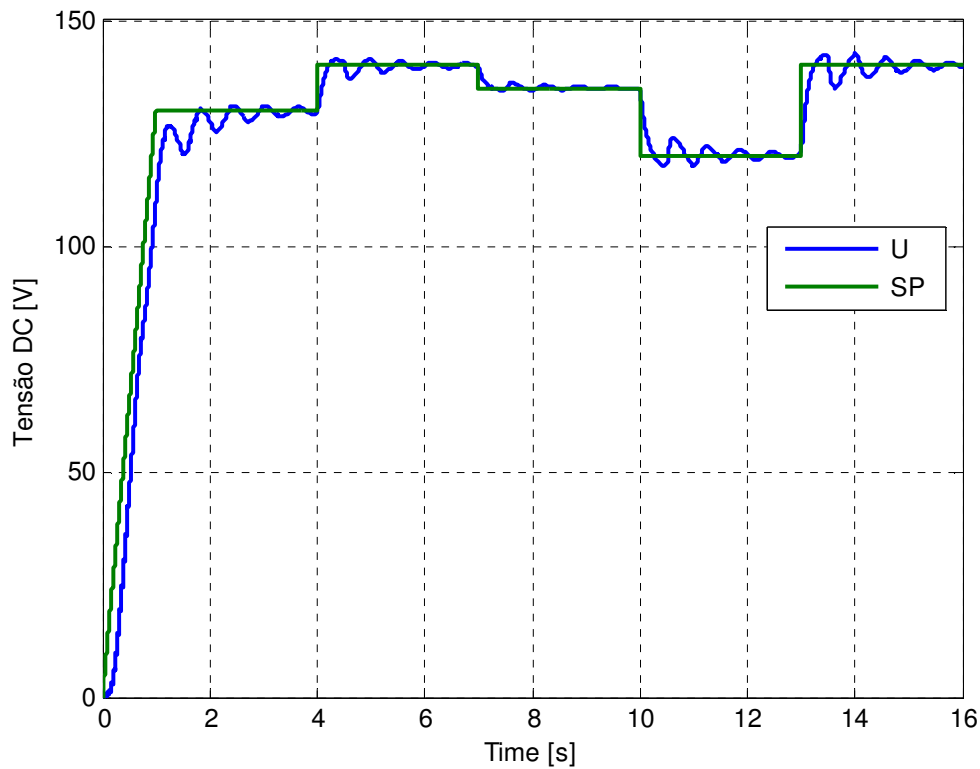
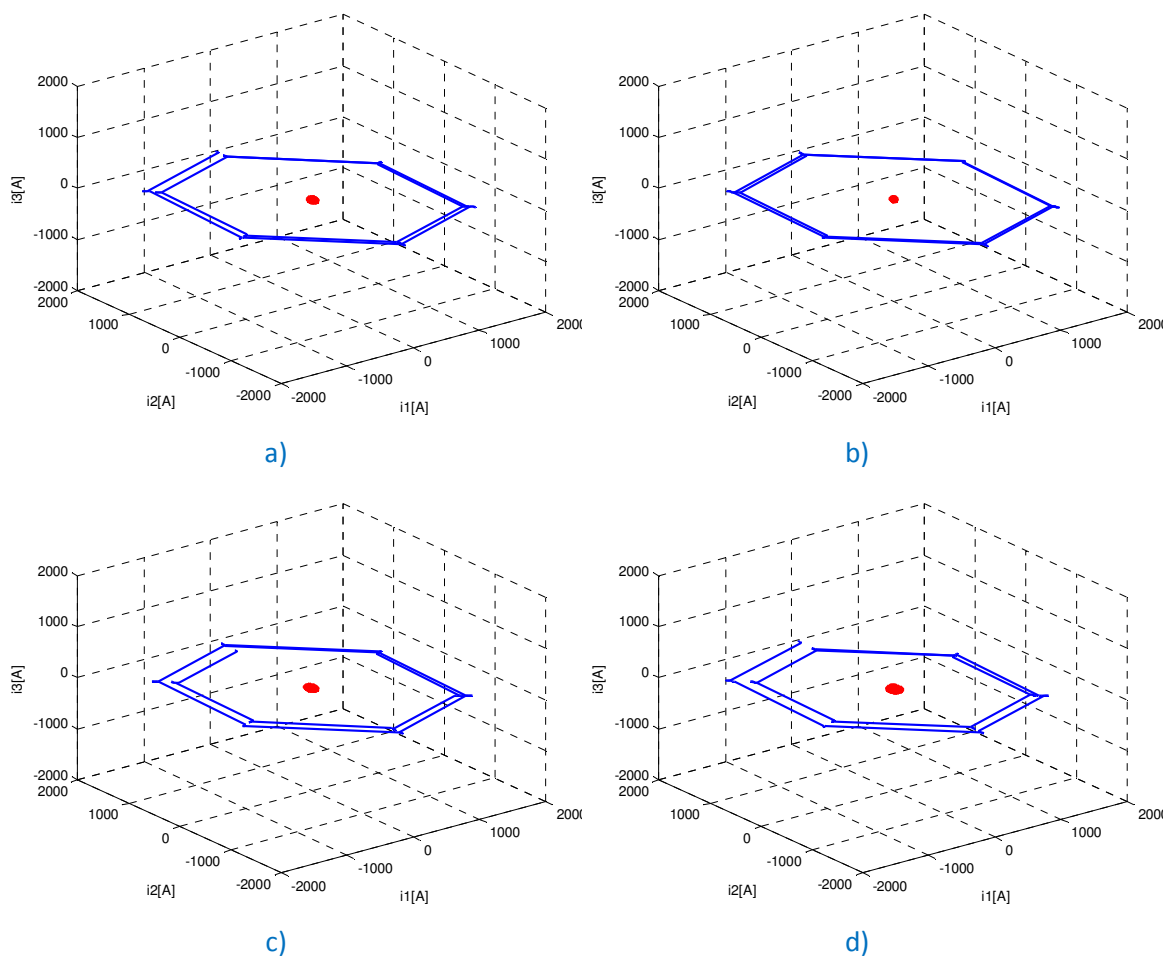


Figura 50: Valor de referência e tensão CC

Nos instantes que ocorrem as variações do valor de referência da tensão contínua, os padrões representados no espaço 3D não apresentavam quaisquer deformações semelhantes às registadas durante a presença de um defeito num dos semicondutores. A Figura 51 apresenta a representação tridimensional das correntes de alimentação do retificador nos 4 instantes acima mencionados.



**Figura 51: Representação 3D das correntes nos instantes de mudança do valor de referência da tensão CC**

De referir que a Figura 51 apresenta os padrões obtidos durante as transições que se verificam nos instantes 4, 7, 10 e 13 segundos. Estas figuras tridimensionais foram representadas utilizando os valores das correntes durante dois ciclos, os 20ms antes da mudança de referência de tensão e os 20ms seguintes.

É possível verificar que os hexágonos mantêm-se geometricamente corretos, notando-se perfeitamente uma mudança no seu “raio equivalente” provocada pela alteração dos valores das correntes, imposta pelo controlador, de modo a colocar a tensão CC no novo valor desejado. É bem visível a diferença entre o “raio equivalente” da Figura 51 b) e d), pois correspondem aos instantes 7s e 13s onde ocorre a menor e maior variação da referência, respetivamente, de 140V para 135V e 120V para 140V.

Nos instantes em questão, os valores das Variáveis de Diagnóstico Normalizadas, para as 3 correntes de alimentação (VDN1, VDN2, VDN3) mantiveram valores muito próximos de zero. Os comportamentos destas variáveis ao longo do tempo pode ser observado através das figuras seguintes. Verificou-se também que as pequenas perturbações que se verificam durante as transições não são suficientes para o sistema indicar falha de semiconductor.

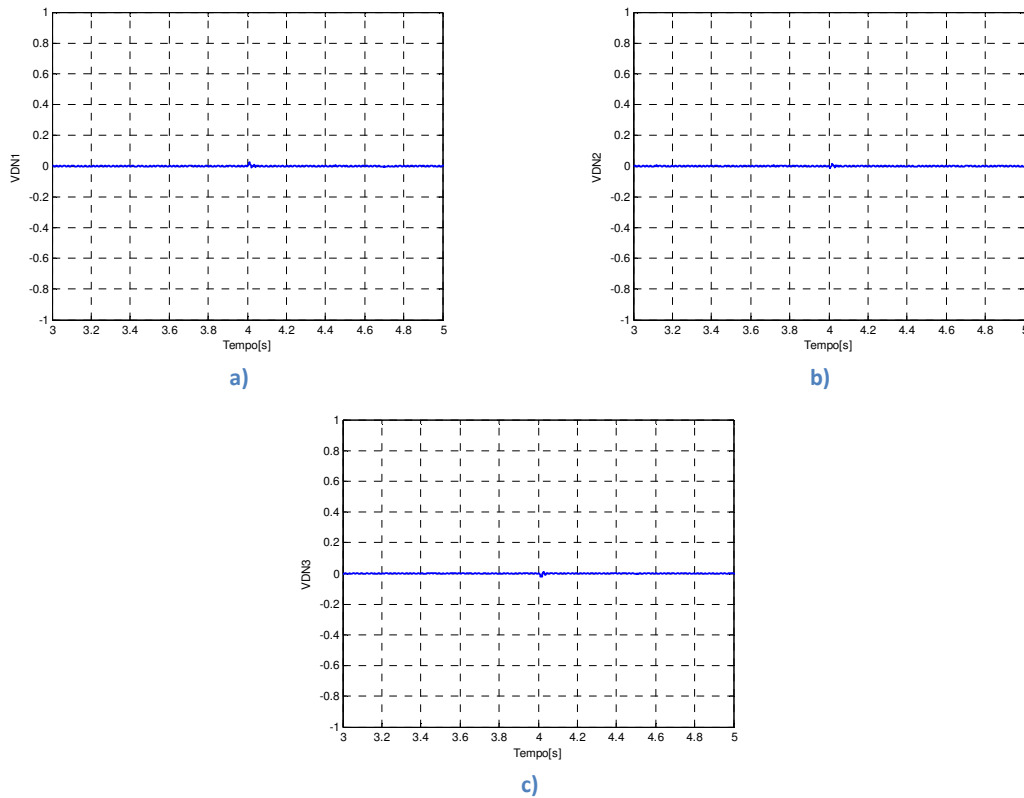
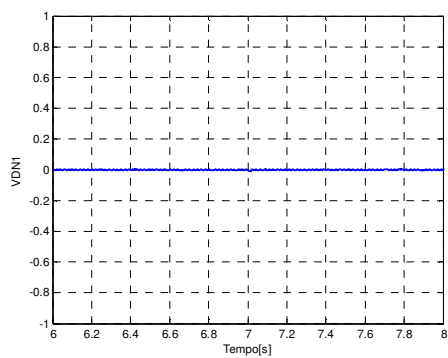
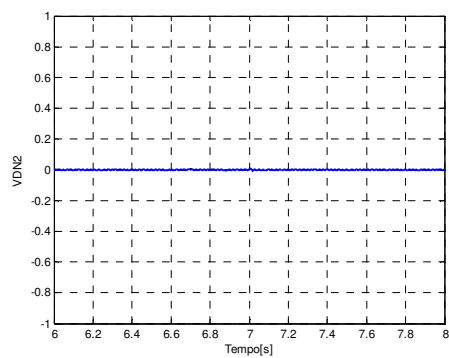


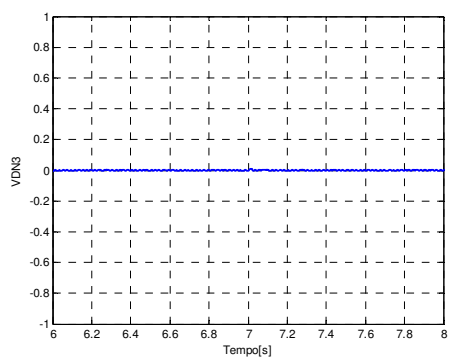
Figura 52: Variação das VDN com alteração do setpoint de tensão CC no instante 4s



a)

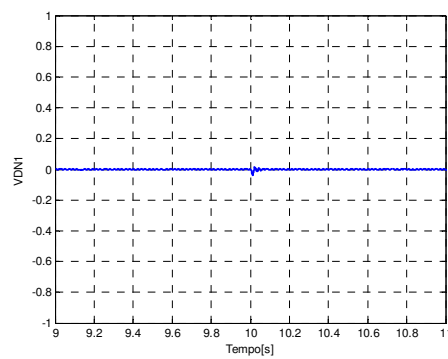


b)

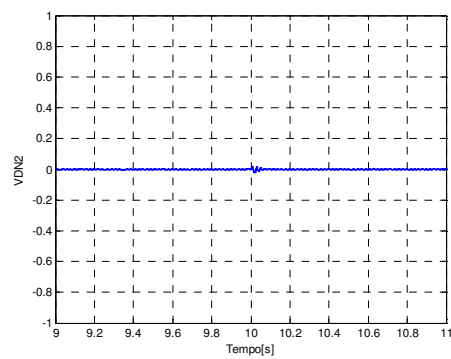


c)

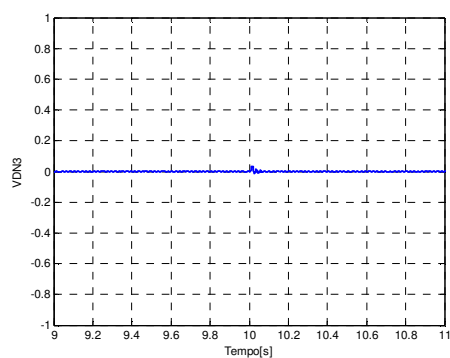
Figura 53: Variação das VDN com alteração do setpoint de tensão CC no instante 7s



a)



b)



c)

Figura 54: Variação das VDN com alteração do setpoint de tensão CC no instante 10s

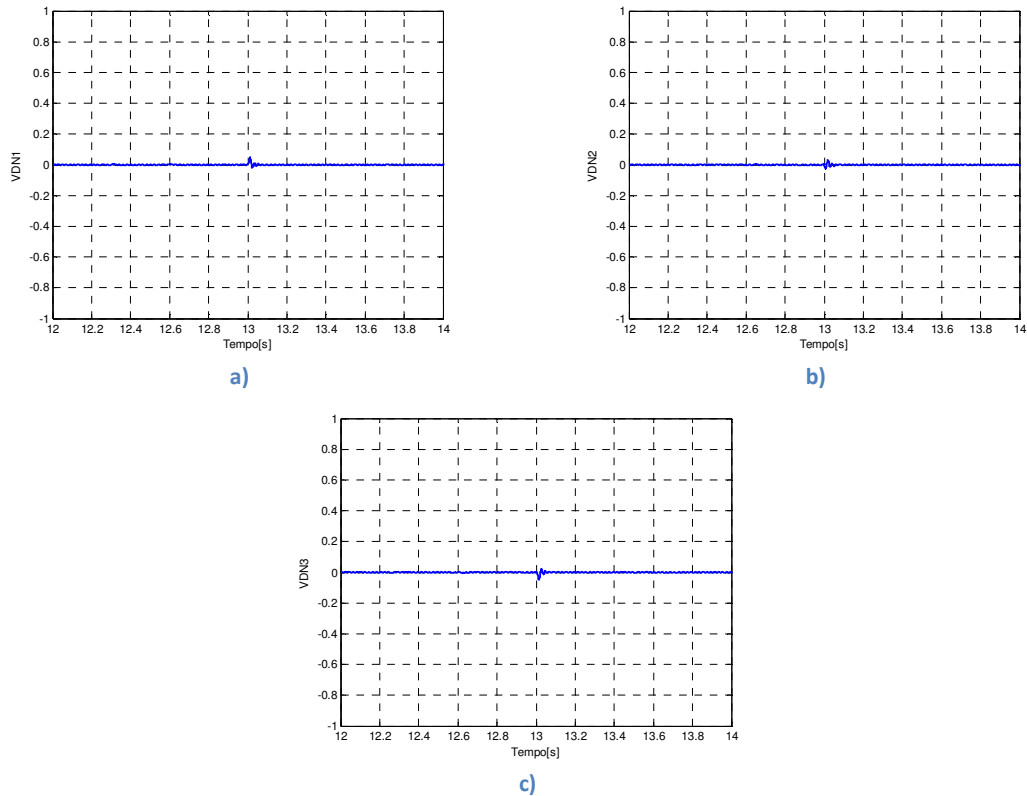


Figura 55: Variação das VDN com alteração do setpoint de tensão CC no instante 13s

As Figuras 52, 53, 54 e 55 correspondem aos instantes 4s, 7s, 10s e 13s respetivamente.

Tal como descrito anteriormente, as VDN mantêm valores bastante próximos de zero, no entanto é possível verificar que nos instantes em questão que existe uma pequena variação, mas quase impercetível, sendo mesmo na Figura 55 onde se nota a maior variação, dado ser nesse instante, 13 segundos, que é efetuado a maior variação de tensão, passando do valor de 120V para 140V.

Tabela 11: Valores das VDN nos instantes de alteração de referência da tensão CC

Tempo [s]	VDN1	VDN2	VDN3
4	-0,001130	0,011141	-0,010010
7	-0,000339	-0,005002	0,005341
10	-0,000563	-0,017732	0,018295
13	-0,003232	0,022035	-0,018802

Ao ser aplicado o comparador de três níveis aos valores obtidos durante este ensaio, indicados na Tabela 11, verifica-se que nenhum desses valores, em módulo, é suficientemente elevado para transpor o valor de 0,03 definido para a histerese.

Os resultados obtidos com a aplicação do comparador estão indicados na Tabela 12.



**Tabela 12: Valores de VDN\* nos instantes de alteração do SP de tensão CC**

Tempo [s]	VDN1	NVD2	NVD3
4	0	0	0
7	0	0	0
10	0	0	0
13	0	0	0

Tal como se pretendia demonstrar, este algoritmo de deteção e diagnóstico responde corretamente à variação de tensão solicitada ao retificador sem gerar falsos positivos quando há alterações no ângulo de disparo impostas pelo controlador de tensão. Comparando a Tabela 12 com a Tabela 1 é possível constatar que todos os padrões obtidos durante este ensaio simulado correspondem à situação de ausência de falha nos semicondutores.

## 5.4. Deteção de falhas no retificador de excitação pela análise da tensão CC

---

A aplicação do método de deteção e diagnóstico pelo centro de massa não é facilmente implementável em sistemas de excitação já existentes, pois a aquisição das correntes de alimentação do retificador, essencial para o algoritmo em questão, nem sempre está disponível.

Deste modo é proposta uma nova abordagem em que será utilizada a tensão contínua do retificador do sistema de excitação. Nesta abordagem será utilizado um princípio similar ao anterior, ou seja, através da análise de padrões. Para a identificações dos diversos padrões será utilizado um método baseado na análise das componentes principais (PCA).

Para este método será utilizada a tensão de saída do retificador. No entanto, de modo a criarem-se padrões para a identificação de falha, para além deste sinal, denominado de  $v_{CC}$ , será utilizado um segundo sinal obtido a partir da mesma tensão mas com uma certa defasagem  $v_{CC,desf}$ . O desfasamento desta tensão é de meio ciclo (0.01s). O sistema de geração de sinais utilizados para obtenção de padrões típicos, é indicado na Figura 56.

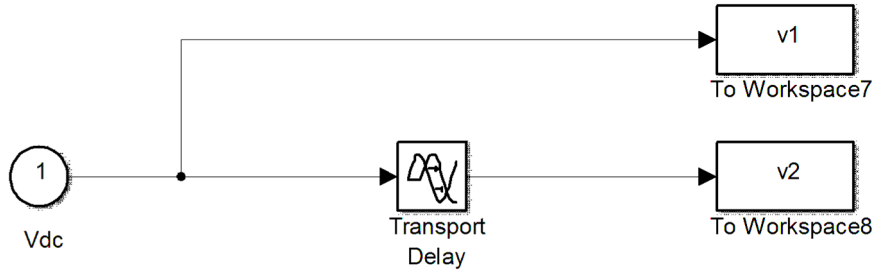


Figura 56: Geração dos sinais utilizados para a criação de padrões.

Os sinais que irão ser utilizados para o diagnóstico de falha de semicondutor serão designados de  $v_1$  e  $v_2$  respetivamente, como indicado na expressão (7).

$$\begin{cases} v_1 = V_{CC} \\ v_2 = V_{CC\_desf} \end{cases} \quad (7)$$

A tensão de saída do retificador ( $v_1$ ) reflete a falta do disparo de um dos tirístores. A Figura 57 ilustra a tensão de saída do retificador e a tensão desfasada em meio ciclo numa situação de ausência de avaria nos semicondutores. É possível verificar que as suas formas de onda são exatamente iguais.

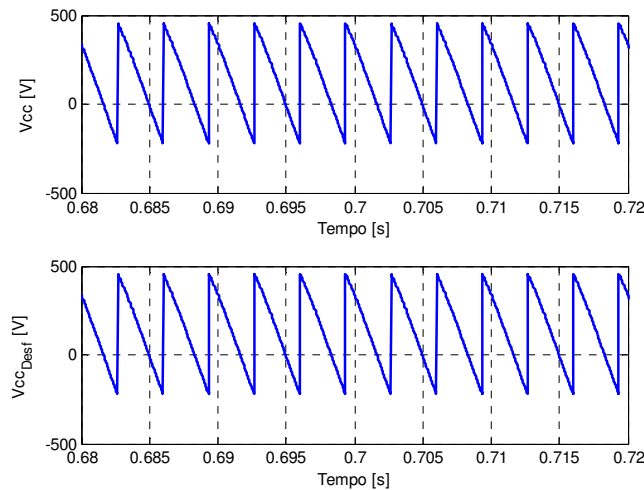


Figura 57: Tensão de saída e tensão desfasada na ausência de defeito

Através das duas tensões ( $v_1$  e  $v_2$ ) é obtido o padrão, para este método, que indica a ausência de defeitos no retificador. À imagem do método anterior, estes padrões bidimensionais são obtidos a partir da representação de  $v_2$  em função de  $v_1$ , como indicado na Figura 58, sendo no caso de funcionamento sem falha obtida uma reta.

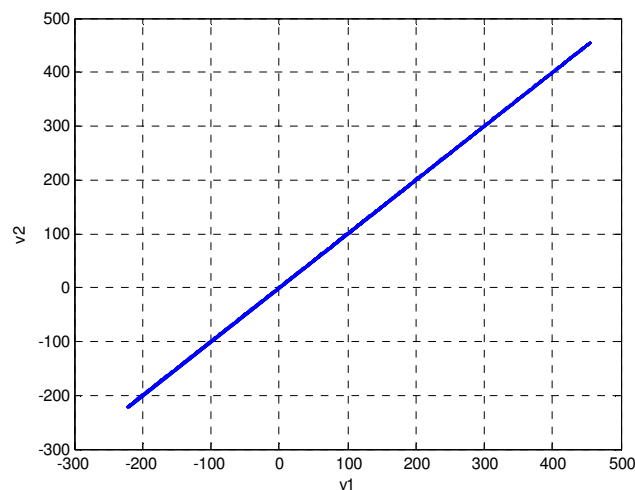


Figura 58: Padrão em funcionamento normal

A situação de falha de circuito aberto no semiconductor tem reflexos na tensão de saída, como pode ser observado na Figura 59. A tensão  $v_1$  diminui o seu valor médio devido à falta de condução de um dos tirístores e meio ciclo depois, essa diminuição de tensão, é verificada na tensão desfasada  $v_2$ .

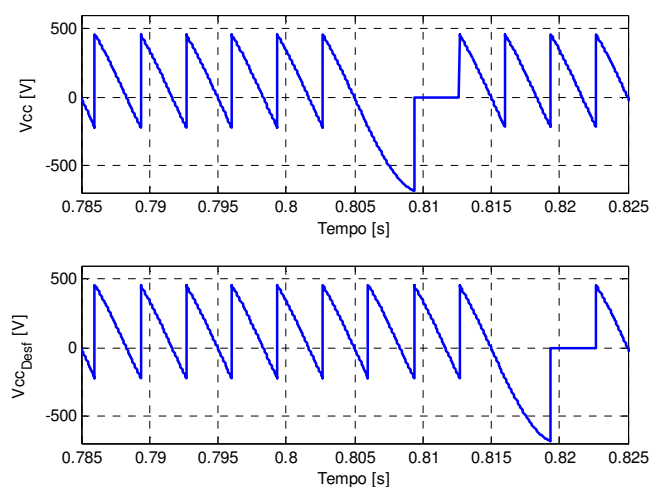


Figura 59: Tensão de saída e tensão desfasada na presença do defeito

Nesta situação de defeito o padrão altera-se, deixando de ser uma reta, tornando assim possível identificar um funcionamento anormal no retificador. O padrão para uma situação de presença de defeito de circuito aberto está indicado na Figura 60.

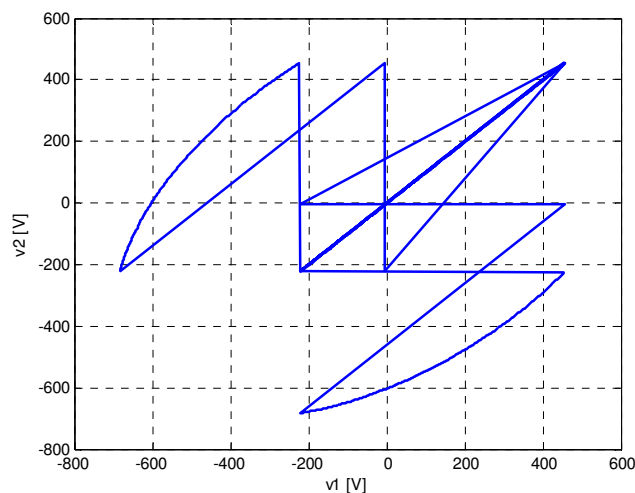


Figura 60: Padrão para funcionamento com falha de circuito aberto

De salientar que este método, analisando apenas a tensão de saída do retificador, não tem a capacidade de diagnosticar qual o semiconductor que está em defeito, sendo apenas capaz de detectar a existência de uma falha no retificador.

### 5.4.1. Análise das componentes principais

O método linear estatístico de análise de componentes principais tem como objetivo diminuir o número de variáveis originais, correlacionadas entre si, num conjunto de variáveis independentes denominadas de Componentes Principais (PC) [23]. As componentes principais são constituídas por uma combinação linear das variáveis originais. A grande vantagem deste método é a redução da informação das variáveis correlacionais, de certa forma repetida, numa ou mais combinações lineares independentes que contem a maioria da informação das variáveis originais. Nas combinações lineares obtidas cada variável tem um peso diferente e sendo as componentes principais perpendiculares entre si, cada uma tem uma informação estatística diferente.

Analisando o exemplo exposto na Figura 61, observa-se que a 1ª componente principal tem uma variância superior à da 2ª componente principal. Isto acontece porque a 1ª componente principal tem um valor próprio  $\lambda_1$  superior ao  $\lambda_2$  da 2ª componente principal.

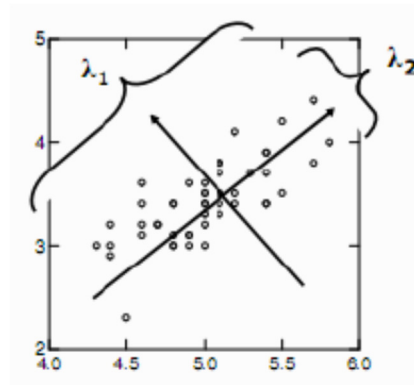


Figura 61: Comparação dos valores próprios  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  [23]

O peso estatístico das variáveis originais é igual para todas as variáveis, mas as componentes principais têm pesos estatísticos diferentes. Quer isto dizer que as primeiras componentes principais têm uma importância estatística superior, podendo desvalorizar as restantes. São estas características que permitem analisar os resultados segundo os dois critérios indicados a seguir.

- As componentes principais podem ser analisadas separadamente devido à sua perpendicularidade, que representa o peso que as variáveis originais têm na combinação das componentes principais.
- O conjunto da amostra pode ser visualizado pelo gráfico das duas componentes principais, pois são estas que contêm a maioria da informação estatística.

Resumindo este método, é possível afirmar que a Análise de Componentes Principais é uma técnica linear de redução da dimensão, que adquire a variância entre variáveis. Consegue obter os vetores perpendiculares que são organizados ordenando-os pela quantidade de variância conforme a direção dos vetores perpendiculares.

### 5.4.2. Detecção de falhas

Tal como foi referido, neste método são criados padrões típicos que vão permitir identificar uma falha de retificador, sendo utilizado o método estatístico de Análise de Componentes Principais (PCA) para a identificações dos respetivos padrões.

O conjunto de dados que constituem as componentes principais pode ser obtido de diversas formas, como a decomposição dos valores próprios de uma matriz. Os vetores próprios permitem a obtenção de informação como as direções principais do conjunto de dados do vetor, permite conhecer os valores significativos, isto é, os valores próprios, que influenciam a variação de dados pelas direções principais.

Com os dados  $v_1$  e  $v_1$  desfasado ( $v_2$ ) adquiridos é possível calcular os vetores próprios que permitem verificar se existe alguma falha no retificador. Em primeiro lugar é

necessário reunir os dados adquiridos, que representam as grandezas físicas medidas, na matriz de covariância  $S$ .

Esta matriz  $S$  é composta pelas variáveis  $v_1$  e  $v_2$ , que formam as colunas e por  $n$  linhas, em que  $n$  representa o número de amostras. O instante inicial é designado por  $t_0$  e o tempo de cada amostra por  $\Delta t$ . Esta matriz está indicada na expressão (8).

$$S = \begin{bmatrix} v_1(t_0) & v_2(t_0) \\ v_1(t_0 + \Delta t) & v_2(t_0 + \Delta t) \\ \vdots & \vdots \\ v_1(t_0 + (n-1)\Delta t) & v_2(t_0 + (n-1)\Delta t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Com a definição da matriz  $S$ , através da expressão (9), é possível calcular a matriz de correlação  $E$  de onde são retirados os vetores próprios ( $v_1$  e  $v_2$ ) e valores próprios ( $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ ).

$$E = S^T \cdot S \quad (9)$$

Uma das formas para a obtenção de valores e vetores próprios é pela relação onde são definidos os vetores próprios da matriz  $E$  com um vetor que satisfaz a relação da expressão (10).

$$Ev = v\lambda \quad (10)$$

Simplificando a expressão é obtida:

$$(E - \lambda I)v = 0 \quad (11)$$

Onde  $\lambda$  é o valor próprio relacionado com vetor próprio  $v$  e  $I$  a matriz identidade.

### **Deteção de falhas no retificador do sistema de excitação**

Para a identificação de falha de semicondutor, apenas é necessário utilizar os valores próprios. Assim, com a obtenção dos valores ( $\lambda$ ), o algoritmo de deteção de falha analisa estes dados e verifica se o retificador está em falha. Os valores próprios obtidos neste método são o  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  e são utilizados no algoritmo de deteção que está indicado Figura 62.

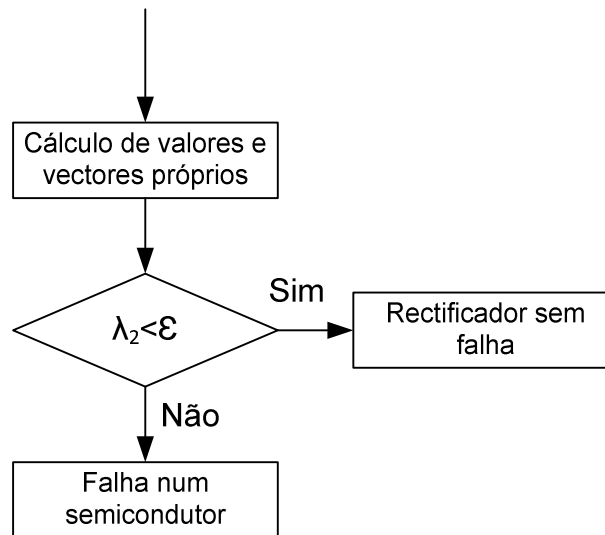


Figura 62: Diagrama de blocos do algoritmo de deteção de falha

O algoritmo deteta a falha no retificador quando  $\lambda_2$  é superior ou igual a  $\epsilon$  (patamar de disparo). Esta constante tem como função evitar que o algoritmo detete falsos positivos quando  $\lambda_2$  possui algum ruído.

Na demonstração deste método foi simulada uma avaria de circuito aberto no tiristor 1 no instante 0,8s. É possível verificar pela análise da Figura 63 a) e b), que antes do instante 8s o valor de  $\lambda_1$  é cerca de  $8 \times 10^4$  e  $\lambda_2$  é aproximadamente zero. Após o aparecimento do defeito em T1, ambos os valores próprios alteram-se, ficando  $\lambda_1$  com um valor de cerca  $8,8 \times 10^4$  (após o transitório) e  $\lambda_2$  cerca de  $7,4 \times 10^4$ .

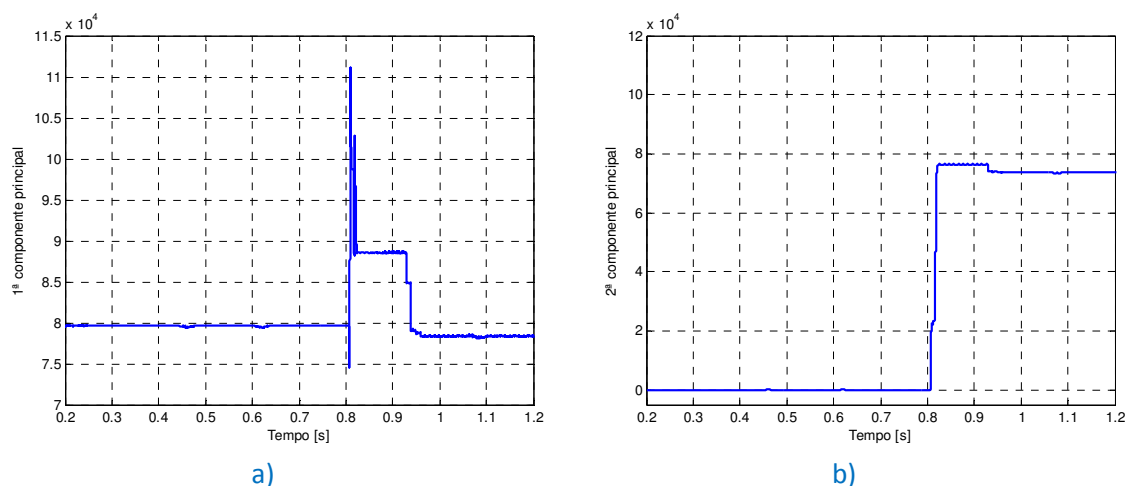
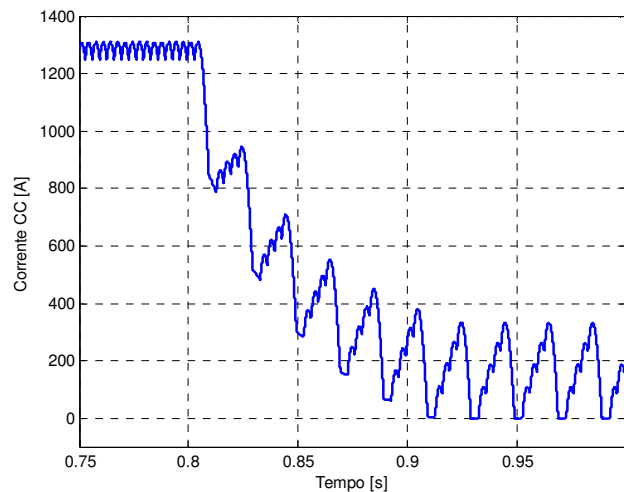


Figura 63: Variação dos valores próprios na presença do defeito em T1

Contudo, é esperado que o valor de  $\lambda_1$  se mantenha por volta dos  $8,8 \times 10^4$  durante a presença do defeito, o que não acontece, dado que o seu valor é alterado para aproximadamente  $7,8 \times 10^4$  perto do instante 0.93s. Isto verifica-se porque nesse instante o sistema passou a

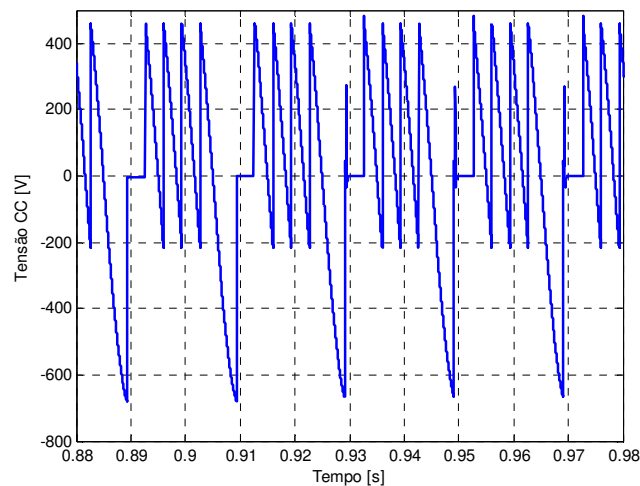
funcionar num regime descontínuo, ou seja, a corrente passou a atingir o valor zero durante as suas oscilações. Um comportamento similar verifica-se para o  $\lambda_2$ . De facto, após a presença de defeito o valor desta componente passa de zero para  $7.65 \times 10^4$ , voltando este valor a alterar para  $7.4 \times 10^4$  em 0.93s devido ao sistema passar a regime descontínuo.

Apesar do sistema passar a funcionar em regime descontínuo, o algoritmo continua a detetar o defeito no retificador, dado que para o fazer utiliza o valor próprio  $\lambda_2$  que, apesar de sofrer alguma influência com a mudança no regime de funcionamento, este continua a ser claramente superior a zero.



**Figura 64: Comportamento da corrente durante a presença do defeito em T1**

O efeito da passagem para o regime de descontínuo também é visível na tensão, verifica-se o aparecimento de picos transitórios a partir do instante 0,93s, como se pode ver na Figura 65.

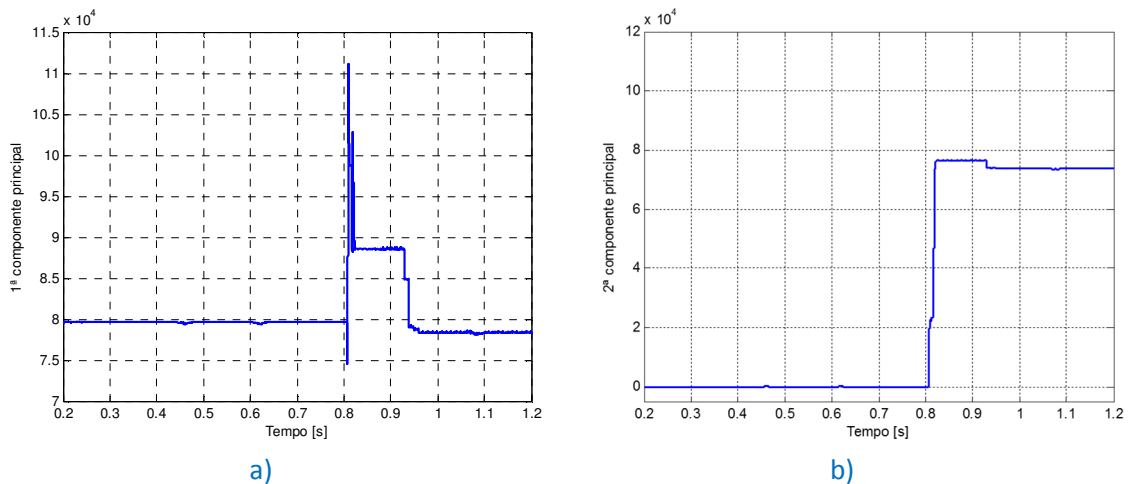


**Figura 65: Comportamento da tensão quando se entra no regime descontínuo**



Com o objetivo de verificar que este método funciona corretamente, foi efetuado um ensaio simulado provocando um defeito no tiristor 6, localizado na parte inferior do segundo braço do retificador. Tal como no ensaio anterior o defeito foi provocado no instante 0,8s.

Comparando as figuras 66 e 63 é possível observar que as figuras resultantes da simulação de defeito no tiristor 6 são praticamente iguais às obtidas durante o defeito no T1.

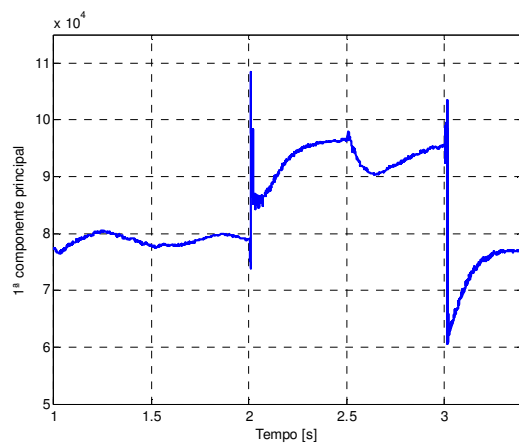


**Figura 66: Variação dos valores próprios durante o defeito de T6**

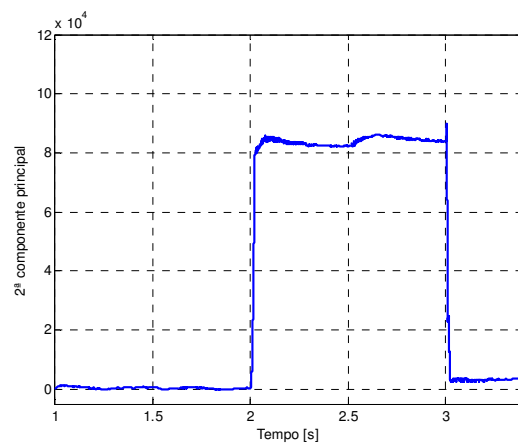
Para este ensaio foi colocado em funcionamento o controlo de tensão no barramento CC, para deste modo garantir que o retificador mantém o valor médio da tensão de saída igual ao valor de referência. Nesta situação verifica-se que não vai existir regime descontínuo mesmo na situação da avaria simulada no tiristor T1. O defeito de circuito aberto no tiristor T1 foi provocado no instante 2s e tem a duração de 1s.

Na Figura 67 é possível observar que o valor próprio  $\lambda_1$ , antes da falha, tem valores equivalentes aos verificados nos ensaios anteriores. A oscilação que apresenta é reflexo do funcionamento do controlador de tensão. Analisando o  $\lambda_1$  durante a presença do defeito de circuito aberto em T1, verifica-se que este, apesar da oscilação causada pela resposta do controlador de tensão, se mantém com um valor superior ao registado antes do defeito.

Quanto ao valor próprio  $\lambda_2$ , observa-se que mantém o mesmo comportamento com e sem o controlo de tensão. Tal como  $\lambda_1$ , o  $\lambda_2$  apresenta alguma oscilação, também reflexo do funcionamento do controlador de tensão. Contudo, apesar da oscilação os valores obtidos durante a falha são claramente superiores a zero.



a)



b)

Figura 67: Variação dos valores próprios durante o defeito em T1 com o AVR em funcionamento

# Capítulo 6

## Conclusões

---

Neste trabalho foram apresentadas duas novas abordagens para detecção e diagnóstico em retificadores do circuito de excitação de geradores síncronos.

As abordagens adotadas basearam-se em algoritmos de identificação de padrões. Na primeira abordagem o diagnóstico e detecção é efetuado a partir da análise das correntes alternadas de entrada do retificador. Estas correntes são representadas num referencial tridimensional, no qual são criados padrões conforme o retificador se encontra na situação de falha ou não. No caso de funcionamento normal do retificador, é obtido um hexágono com o centro na origem dos 3 eixos das correntes. Durante uma falha de circuito aberto num dos tirístores é representado metade do hexágono, sendo através do deslocamento do centro de massa e do raio equivalente, que se identifica o tiristor em falha. Para análise destes padrões utilizou-se um método designado de centro de massa.

Também foi proposto uma variável normalizada de diagnóstico com o objetivo de aplicar este método independentemente das correntes implicadas no processo.

Este método não necessita de cálculos complexos, o que se traduz num sistema que não necessita de grande capacidade de cálculo.

As simulações utilizando o método do centro de massa descritas acima, tiveram como objetivo mostrar a eficiência da aplicação deste método. Tal como se pode verificar ao longo de todas as simulações, independentemente do valor da corrente no barramento CC, os padrões obtidos foram sempre os mesmos para as mesmas avarias provocadas, sendo possível identificar com toda a clareza qual o tiristor danificado.

A segunda abordagem baseia-se na análise da tensão contínua do retificador. De modo a desenvolver um método similar ao anterior, nomeadamente, baseado na análise de padrões, utilizou-se um segundo sinal, nomeadamente o mesmo sinal de tensão mas com um certo desfasamento. Para análise dos padrões obtidos, utilizou-se uma análise pelo método das Componentes Principais. Através da análise das componentes principais obtêm-se dois valores próprios,  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , que, na presença de uma avaria, assumem valores que identificam um

funcionamento anômalo no retificador. No algoritmo de detecção de defeito no retificador a variável utilizada é o valor próprio  $\lambda_2$  que reflete a existência de um defeito.

Este método, apesar de não diagnosticar qual o semicondutor em defeito, tem a vantagem de ser mais facilmente implementado que o primeiro, isto porque necessita apenas de uma variável, a tensão de saída do retificador, ao invés do primeiro método que necessita de três variáveis que são as correntes. De salientar que a aquisição de tensões é mais simples de implementar que a aquisição de correntes num sistema já instalado.

No sentido de confirmar as abordagens adotadas neste trabalho, foram efetuadas diversas simulações. Estas simulações foram efetuadas com o *software Matlab/Simulink*, controlando o retificador tanto em cadeia aberta como em cadeia fechada. Através destes resultados foi possível confirmar que os métodos propostos permitem detetar falhas de semicondutor.

# Bibliografia

---

- [1] "[General Description of the Turbine](#) -HTGD 690 188 E1", BBC Brown Boveri, pp 1-8.
- [2] "Turbotrol- [Electronic controller for steam turbines](#) - HTDG 600 185 E", Consortium Mague BBC, pp 1-70, 1984.
- [3] Armando Santos, "[PTSN - DCS e Turbotrol - Controlo de Frequência em situação de rede perturbada](#)", EDP Produção, pp 1-3, 2006.
- [4] Armando Santos, "[Sistema de controlo distribuído - Coordenação Caldeira/Turbina](#)", CPPE, pp 1-20, 2004.
- [5] "[Turbo-Generator](#) - Type WTF 122 Im - Serial No's. HT 100 084/100 085", BBC Brown Boveri, pp 1-6.
- [6] "[Unitrol 6800 Functional Description](#)"- Document No: 3BHS239062 E01 Ver.D Version: 10/2009, ABB, pp 1-111,2009.
- [7] Armando Santos, "[Geradores Síncronos da PTSN - Diagrama de Carga e Ângulo Polar](#)", EDP Produção, pp 1-9, 2006.
- [8] Everaldo Simões Gaspar, "[Desenvolvimento de Equipamento para Avaliação da Degradação de Semicondutores de Potência](#)", Universidade Federal de Itajubá, pp 1-165, 2005.
- [9] HanJing-yong, LiuHong-da, YueWen-jie and ShenNai-jun, "Fault Detection Method in Micro-grid Multi-Pulse Thyristor Rectifier Circuit", College of Automation Harbin Engineering University Harbin, China.
- [10] Liu Qingfeng,Leng Zhaoxia,Sun Jinkun and Wang Huamin, "Fault Detection of Rectifier based on Residuals",2012 International Conference on Solid State Devices and Materials Science.

- [11] Xu De-hong, Cheng Zhao-ji and Cui Xue-jun, "Fault diagnosis of power electronic circuits with discrete fourier transform", Journal of Zhejiang University (Nature Science), vol. 28, pp. 666-674, Nov 1994.
- [12] Li Min-yuan and Chen Ru-qing , "ON-LINE FAULT DIAGNOSIS SYSTEM FOR HIGH-POWER CONTROLLED RECTIFIER BASED ON IMPROVED FREQUENCY ANALYSIS METHOD", Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, vol. 24, pp. 163-167, Oct 2004.
- [13] Ma Hao and Lee Y S, "Fault diagnosis of power electronic circuits based on neural network and waveform analysis", IEEE 1999 International Conference on Power electronics and Drive System, PEDS'99, vol. 1, pp. 234-237, Jul 1999.
- [14] Long Bo-hua, Tan Yang-hong, Xu Hui, Sun Lei and Wen Juan, "Fault Diagnosis of Power Electronic Circuits Based on Quantum Neural Network", Transactions of China Electrotechnical Society, vol. 24, pp. 170-174, Oct 2009.
- [15] K. Rothenhagen, F. W. Fuchs "Performance of Diagnosis Methods for IGBT Open Circuit Faults in Three Phase Voltage Source Inverters for AC Variable Speed Drives", Conf. Power Electronics and Applications, EPE'05 , 2005.
- [16] A.M.S. Mendes, A. J. Marques Cardoso "Voltage Source Inverter Fault Diagnosis in Variable Speed AC Drives, by the Current Park's Vector Approach", Conf. Rec. IEEE-IMDC, pp. 704-706, 1999.
- [17] R. Peugeot; S. Courtine; J. Rognon, "Fault Detection and Isolation a PWM Inverter by Knowledge-Based Model", IEEE – Transaction on Industry Applications, vol 34, no 6 , pp. 1318- 1326, 1998.
- [18] C. Kral and K. Kafka, "Power electronics monitoring for a controlled voltage source inverter drive with induction machines," in Proc. IEEE Power Electron. Spec Conf., 2000, pp. 213-217.
- [19] D. Foito, J. F. Martins, V. Fernão Pires, J. Maia, "An Eigenvalue/Eigenvector 3D Current Reference Method for Detection and Fault Diagnosis in a Voltage Source Inverter", The 35rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)", pp 195-199, 2009.
- [20] M. R. Mamat, M. Rizon and M. S. Khanniche, "Fault detection of 3-phase VSI using Wavelet-Fuzzy Algorithm," American Journal of Applied Sciences, pp. 1642-1648, 2006.
- [21] F. Charfi, F. Sellami, K. Al-Haddad, "Fault diagnosis in power system using wavelet transforms and neural networks," in Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2006, pp. 1143-1148.

- [22] V. Fernão Pires, Tito G. Amaral, J. F. Martins, "[Fault Detection and Diagnosis of Voltage Source Inverter using the 3D Current Trajectory Mass Center](#)", 2012 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), pp 737-742, 2012.
- [23] Sérgio David Paixão Marques dos Santos, "[Metodologias de Controlo e Diagnóstico de Falhas com Aplicação em Motores de Corrente Contínua](#)", Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, pp 59-61, 2011.